

JAERI-Tech
2001-038



JP0150707



水中断熱構造の検討

2001年 6月

斎藤 和男*・楠 剛・石田 紀久

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

水中断熱構造の検討

日本原子力研究所東海研究所エネルギー・システム研究部

齊藤 和男^{*}・楠 剛・石田 紀久

(2001年4月2日受理)

改良船用炉M R X 及び深海科学調査船用原子炉D R X では、水を張った原子炉格納容器内に原子炉容器や配管を設置する。これら原子炉容器や配管の内部流体は運転時には高温となるため、格納容器に張った水とは断熱して、熱の放散を防ぐ必要がある。一般のプラントにおける大気中の保溫と比べて、水中での断熱方法はいまだ確立された技術とはいえない。配管の水中断熱について、従来方式である二重管とする方法以外の方法について検討し、蒸気層と耐熱性プラスチック、ポリイミドを用いた断熱構造を試設計した。また、断熱の成立性を簡便なモデル実験により確認した。

Design Study for Thermal Insulation Method of Submerged Piping

Kazuo SAITO*, Tsuyoshi KUSUNOKI and Toshihisa ISHIDA

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 2, 2001)

In the advanced marine reactor MRX or the deep sea reactor DRX, reactor pressure vessels and pipings are submerged in the water which fills containment vessels. On operation, temperatures of these vessels and pipings are high. So, thermal insulation structures applicable in the water are required in order to prevent thermal loss. In comparison with insulations for ordinary plants in atmosphere, there is no established method for submerged conditions except concentric double piping method.

A new thermal insulation method for submerged piping is investigated using steam layer and engineering plastic-polyimid-. Concrete design structures for this method are proposed and validity are confirmed by a simple experimental model.

Keywords : Thermal Insulation, Submerged Piping, MRX, DRX, Containment Water, Steam Layer, Polyimid

* Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd

目 次

1. 目 的	1
2. 検討条件	1
2. 1 断熱条件	1
2. 2 耐水条件	1
2. 3 その他の設計条件	2
3. 設 計	2
3. 1 検討の経緯	2
3. 2 蒸気層による断熱	3
3. 3 ポリイミドの使用	4
3. 4 断熱材厚さの決定	5
4. 断熱構造の製作設計	6
4. 1 直管部	6
4. 2 曲管部	8
4. 3 分岐部	8
5. 確認実験	9
5. 1 実験目的	9
5. 2 実験装置と方法	9
5. 3 実験結果と評価	11
6. まとめと今後の課題	15
謝 辞	17
参考文献	17
付録-1	86
付録-2	93

Contents

1. Introduction	1
2. Conditions	1
2. 1 Thermal Insulation Condition	1
2. 2 Watertight Condition	1
2. 3 Additional Conditions	2
3. Design	2
3. 1 Background	2
3. 2 Thermal Insulation using Steam Layer	3
3. 3 Utilization of Polyimid	4
3. 4 Determination of Essential Dimensions of Layers	5
4. Example Drawings of Thermal Insulation Structures	6
4. 1 Straight Piping	6
4. 2 Curved Piping	8
4. 3 Branch Piping	8
5. Experimental Confirmation of Validity	9
5. 1 Purpose	9
5. 2 Experimental Apparatus and Procedure	9
5. 3 Results and Analysis	11
6. Conclusion and Future Subjects	15
Acknowledgement	17
References	17
Appendix-1	86
Appendix-2	93

1. 目的

改良船用炉MRX¹⁾、深海科学調査船用原子炉DRX²⁾等の改良型船用炉においては、受動的安全性、系統の簡素化、プラントの小型軽量化を目的として水張格納容器を採用している。水張格納容器方式は、原子炉冷却材喪失事故時の受動的な炉心冠水維持方策であるとともに、バルクの二次遮蔽体を省略できることにより大幅な小型軽量化に寄与するもので、これら原子炉の大きな特徴の一つである。この方式の成立性は、直接的にこれら原子炉の実現性を左右する重要な技術である。

改良船用炉MRXでは図1.1に示すように、また深海科学調査船用原子炉DRXでは図1.2に示すように水を張った格納容器の水中に原子炉容器やタービン、配管などを設置する。格納容器内に張られた水の温度は通常運転時において約60°Cであるため、これら容器・機器やその間を連絡する配管、或いは格納容器外機器に繋がる配管のうち、高温流体を内包する機器・配管には熱放散の防止上、水中での断熱が必要となる。

ここではこれら水中配管の水中断熱方法を検討して試設計するとともに、簡便なモデルを用いてこの方法が基本的に成立すること（断熱性能）を確認する。

2. 検討条件

断熱材や断熱構造を検討する際に要求される条件としては断熱条件や放射線の条件に加えて、水中設置であることによる耐水性の条件がある。これらを以下に示す。

2. 1 断熱条件

(1) 許容放熱量

水中断熱を必要とする、代表的な配管の断熱条件である許容放熱量を表2.1に示す。許容放熱量は各配管の合計の放熱量が原子炉熱出力の1%以内となるように設定した。これ以外の主要配管は二重管方式により通常の断熱材を用いて保温されているので水中断熱の対象外である（例、MRX主蒸気系、MRX給水系等）。

(2) 格納容器水の沸騰防止

断熱材外表面において格納容器水は沸騰しないこと、すなわち100°C以下であること。

2. 2 耐水条件

運転時の格納容器水条件は次の通り。

	温度 (°C)	圧力 (MPa)
通常運転時	60	大気圧
機器故障時	150	0.5

この条件において、

- (1) 管外表面が格納容器水に晒される部分は極力少ないこと。
- (2) 断熱材素材やそれらの結合材等から有害成分が格納容器水中に溶出しないこと。

尚、LOCA時の格納容器水条件 (200°C、4.0 MPa) に対しては上記条件及び断熱条件とも満たす必要はない。

2. 3 その他の設計条件

(1) 耐熱膨張性

配管の熱膨張或いは容器・機器間の相対熱移動に対して破損、脱落等がなく、形状及び断熱性能を維持すること。

(2) 耐放射線性

下表の吸収線量に耐えられるものであること。

	照射線量当量率* ¹ (Sv/h)	20年連続運転時 吸収線量(Gy)
γ線	1×10^3	1.8×10^8
中性子線	1×10^1	1.8×10^7
合計	—	2.0×10^8

*1 : DRXの照射線量率分布による、炉心に最も近いノズル位置における値。

MRXでは上表より低い。

(3) 分解・組立性

配管施工後に取付が可能、且つ ISI 検査時及び断熱材自体のメンテナンス時に分解できること。

なお、一次冷却水の漏洩検知性については、一次冷却材保有量モニター等の別途の手段によるため、断熱構造において検知性を確保する必要はない。

3. 設 計

3. 1 検討の経緯

図1.1に示すように、MRXの原子炉容器の水中断熱については、格納容器との間に水密容器を別途設けることにより、大気中用の一般断熱材を使用可能としている。ここでは配管の水中断熱の方式について従来検討してきた経緯を示す。

(1) 二重管方式

M RXの大口径配管（主蒸気系統及び給水系統）については、二重管を用いて格納容器水と遮断したうえで通常の断熱材を用いる設計がなされている¹⁾。しかしながらこの方式は二重管が大口径になる、あるいは容器・配管の熱膨張を吸収するためにベローズを設けなければならない等の制約を伴う。そのため口径の小さい配管や分岐・曲がりの多い配管、或いはよりコンパクトな設計を目指すDR Xの格納容器内配管に適した方式とはいえない。また配管施工後の外管取付ができず、かつ分解も不可能である。

(2) 一般断熱材+防水コーティング方式

付録-1の図-1に示すように、一般断熱材である珪酸カルシウム断熱材またはステンレスフェルト断熱材の外面に防水コーティングを施した方式である。コーティング材は厚さ0.3μのステンレス箔を樹脂バインダーに混ぜて塗料状にしたものであり、スプレーにより防水塗膜を作る。この二種類の断熱材を配管状のヒータに取付けて水中に浸漬し、ヒータを加熱して断熱実験を実施した。結果はいずれも断熱材内部への浸水を生じ、コーティングによる防水性は得られなかった。その上、浸水→高温のヒータ表面で蒸発→蒸気となって水中に流出、という流路が形成されたことにより連続的に放熱され、ヒータ（管）の表面温度が100°C以上に上がらないという結果であった。

(3) ポリイミド+接着剤方式

以上により一般断熱材に替えて、それ自体の耐水性が高く、直接水に触れても吸水しない断熱素材として高分子材料を検討した。その中で耐熱性能が優れ、耐放射線性も高分子材料ではもっとも強いポリイミドを選定した。付録-2にポリイミドを棒状ヒータのまわりに取り付けた試験体による水中断熱試験のまとめを示す。ポリイミドは丸棒成形体より切り出した円筒半割ピースを接着剤により張り合わせて円筒形状にした。この水中試験結果は、ポリイミド材の熱膨張に対して、それらを張り合わせた接着面が強度的にもたずに破損し、ヒータが水に露出した。接着剤には耐熱用工ポキシ樹脂を用いたが、高温での接着強度が不足したものと考えられる。

3. 2 蒸気層による断熱

(1) 蒸気層による断熱の採用

上記の経緯より、二重管以外の方法では完全に防水することは困難と判断した。しかし、二重管では取付分解が困難である。そこで管と断熱材の間に水を導入することにした。水は流入しても流失はしない構造、すなわち流路のできない構造を検討した。

概念図を図3.1に示す。

配管外面と断熱材内面の間に隙間を設け、断熱材に設けた弁を介して格納容器水を導入する。導入された水は管の昇温とともに蒸気となり、この蒸気層と断熱材の両者で断熱条件を達成する。

この断熱構造の考え方は次の通りである。

1) 蒸気層の利用

蒸気層を利用する利点はその低い熱伝導率にある。一般の断熱材である珪酸カルシウムでは300°Cにおいて約0.08W/mKであるのに対して、300°Cの蒸気は約0.035W/mKであり、断熱材として優れている。但し気体であるため放射による伝熱を生じ、また対流による熱伝達の生じないことが条件となる。

2) 流路形成の防止

隙間を完全密閉して空気層とする構造では、300°Cの通常運転時には約0.2MPaの内圧が生じる。また、LOCA等の事故時には格納容器水は約4MPaまで昇圧するため、ポリイミドに外圧設計が必要となる。そこでポリイミドの内外差圧を緩和することを目的として、完全密閉ではなく格納容器水と通じる構造とする。但し出入り口が2ヶ所以上になると流路が形成され、格納容器水が連続的に出入りする結果、連続的に放熱されることになるため、出入り口は1ヶ所に限定する。

3) 内外差圧からの保護

1ヶ所に限定した出入り口には弁を設ける。通常時はばねにより弁閉状態であるが、弁座に細いスリットを設けて、常に格納容器水と通じる構造とする。格納容器の水張り時にこのスリットを通じて導水される。蒸気層の内圧上昇時には、ばねに抗して弁座が開くことにより内圧を解放する。格納容器水圧力上昇時や蒸気層温度低下による減圧時には、ばねと外圧により弁閉を維持して格納容器水の急激な侵入を防ぎ、管のサーマルショックを緩和する。それ以降はスリットを通じて格納容器水と均圧することにより、外圧によるポリイミドの破損を防ぐ。

4) 水層の存在

通常運転時や昇温時は蒸気層の圧力が格納容器水圧力を僅かに上回るため、スリットからの流入は防止でき、蒸気層内に水の層はないものと考えられる。降温時は凝縮した水とともに、圧力の逆転によりスリットを通して侵入した水が蒸気層下部に溜まるものと予想される。この水層部分の熱伝導及び熱伝達量は微少と考えられるので無視する。同様に、管内流体が滞留している行止まり配管の蒸気層も蒸発せずに水層のままである場合も考えられるが、この放熱も無視できるものとする。

3. 3 ポリイミドの使用

水中における断熱構造としては、断熱材の素材自体が耐水性を持つことが構造を簡単にする最も重要な点である。そのため、蒸気層外側の断熱材としてはポリイミド樹脂を用いることとした。特性を一般保温材と比較して表3.1に示す。

1) 耐熱性

表3.1に示すように、断熱材として連続使用可能な温度である熱変形温度は約360°Cである。これは管内流体の最高温度320°Cを上回り、また実際には蒸気層を隔てるために、管内流体よりも低い温度で使用されることから、耐熱性は十分である。

2) 耐水性

吸水率が0.46%であることから、格納容器水を吸水したとしても僅かであり、素材自体の耐水性は十分と判断される。

3) 断熱性

断熱性能を支配する熱伝導率は約0.4W/mKであり、一般保温材である珪酸カルシウムよりも約一桁大きい。この熱伝導率を用いた断熱材厚さと放熱量の関係を図3.2-1, 2に示す。蒸気層はなく、断熱材は温度300°Cの配管外表面に密着しているものとした。外側は60°Cの水または20°Cの大気とし、計算は断熱材外表面温度を収束させる繰り返し計算による。外側熱伝達率は鉛直円柱廻りの自然対流として求めた⁵⁾。

口径32Aの場合、一般プラントの許容放熱量は約80W/mであり、厚さ55mmの保温筒が標準的に使用されている。図の珪酸カルシウムに示すように、この厚さで許容放熱量以下となっていることが判る。これに対して同図のポリイミド20°C大気中のケースでは、熱伝導率の大きいことが影響して、厚さ300mmでも放熱量は80W/m以下にはならない。従って、大気中では妥当な厚さで使用することはできない。水中では熱伝達率が大気中に比べて格段に増加することから、図のポリイミド60°C水中のケースに示すように放熱量は更に増大する。しかし、60°C水中での許容放熱量は表2.1ケース④に示すように560W/mと大きいため、図のようにポリイミドでも50mm以下の妥当な厚さで許容放熱量以下にすることができる。尚、このときの外表面温度は62°C程度であり、格納容器水の沸騰はない。

以上の傾向は口径50Aの配管でも同様である（図3.2-2）。但し表2.1、③のMRX加圧器スプレイ系配管の許容放熱量133W/mは低すぎるため、妥当な厚さでこれを満足させることはできない。

4) 耐放射線性

表3.1に示す限界の吸収線量、約 5×10^6 Gyを2.3節の20年連続運転時の合計吸収線量 2.0×10^8 Gyと比較すると、約0.5年で限界値に達することになる。従って、運転時間の累計で約半年毎にポリイミドを交換する必要がある。この交換周期は予想される一航海の期間と比べて妥当な周期である。

5) 分解組立性

配管施工後に取付ることが可能であり、メンテナンス時には取り外せる断熱構造とするために、配管軸方向の分割及び、この分割したピースを更に円筒半割に分割することが必要となる。ここで耐放射線性があり、格納容器水への有害成分の溶出がなく、且つメンテナンス時に簡便に分離できる接着剤は見あたらない。そこで分割ピースの接続はフランジによるボルト締め或いはバックルによるものとする。ポリイミドのフランジ規格品はないため、丸棒等の素材から加工する必要がある。2社のポリイミド成型品について、通常のバイトにより切削加工やネジ加工の可能であることを確認した。

3. 4 断熱材厚さの決定

図3.3-1, 2に蒸気層とポリイミドを組合せた場合の各層の厚さと放熱量の関係を示す。蒸気層の伝熱は熱伝導のみを考慮し、対流伝熱や放射伝熱はないものとした。上記計算と同様に配管

外表面を300°C、周囲水は60°Cとした。ポリイミド外表面温度を仮定して、熱伝達率を鉛直円柱の自然対流条件として求め、この温度について反復収束させた。

図3.3-1より口径32Aの場合、ポリイミド厚さを一定とすると、蒸気層幅の増加とともに放熱量は低下する。蒸気層のない場合には許容放熱量560W/m以下にするために30mm程度必要（図3.2-1）であったポリイミド厚さは、2.5mmの蒸気層があれば数mmで済むことになる。このことは図3.3-2の口径50Aの場合も同様である（許容放熱量1330W/m）。

また、許容放熱量が133W/mである表2.1のMRX加圧器スプレイ配管の場合は、ポリイミドだけでは断熱材として不成立であったが、蒸気層と組み合わせると、図3.3-2から成立する可能性もてくる。

但し、以上においては蒸気層の対流と放射を考慮していないため、各層の基本厚さの設定においては余裕を見込む必要がある。これらを背景として、以下に示す基本厚さを決めた。

蒸気層の幅は5mm以上とする。これは規格配管においても外径には公差のあること、及びポリイミドは丸棒、厚肉円筒、角材などから切削加工するが、その精度を考慮したものである。

ポリイミドの厚さは30mm以上とする。これはフランジの加工とポリイミド断熱材本体の加工を同じ素材から一体として削り出すことによる（そうでなければ、フランジと本体の“接続”が必要となる）。断熱材本体の外径をフランジの外径と同じにすることは、断熱性能上の余裕の付与となる。ここではフランジ部の強度や加工のしやすさを得るための厚さとして30mmとした。

4. 断熱構造の製作設計

製作設計は配管系統の基本要素である直管部、エルボ等の曲管部及び分岐部について実施する。口径が小さいほど加工が困難となるため、対象とする配管は最も小口径である32A配管とする。設計に際してはポリイミド成形体製品の寸法規格等を考慮する。

4. 1 直管部

図4.1：断熱構造全体図

図4.2：一般部詳細

図4.3：端部詳細

図4.4：熱膨張吸収部（オス）詳細

図4.5：熱膨張吸収部（メス）詳細

図4.6：終端部詳細

図4.7：一般部クランプ詳細

図4.8：熱膨張部クランプ詳細

図4.9：一般部等ガスケット詳細

図4.10：一般部ガスケットシール面構成図

図4.11：ポリイミド断熱材の熱膨張吸収部シール構造

(1) 全体

図4.1は一般部②と端部③及び熱膨張吸収部④、⑤の最小の組合せ例である。

上述の基本厚さの考え方によるポリイミド製品の寸法規格を考慮して、外径は120mm、蒸気層幅は6.5mm、ポリイミド厚さは32.5mmとした。

直管部の分割長さも寸法規格に合わせて200mmを基本とする。実際の配管では一般部②を継ぎ足して必要な長さまで延長する。このとき終点（ノズル等と取合い）での寸法調整には、より短尺の一般部②を作り対応する。

同図で管軸方向にガスケット⑪、⑬が交互に見えているのは、円筒を半割分割したポリイミドを配管に被せる際に、ガスケット溝が90度ずつ、ずれるように組み立てるためである。

同図では断熱構造の両端を、配管に溶接したエンドプレートと終端部⑥で便宜的に区切ってある。エンドプレートは断熱構造全体を保持するためのアンカーである。実際の容器や機器ノズルとの取合い部には、エンドプレートと容器・機器の壁との間を繋ぐ防水構造、例えばペローズ等が別途必要である。

(2) 一般部

図4.2に示すようにフランジにはテーパをつけてある。これは図4.7のクランプで締込むことにより、管軸方向のガスケット締付け力と同時に、円周方向のガスケット締付け力も得るためである。一般部のガスケットは図4.9の形状を、図4.10のように丸めて用いる。管軸方向に沿うシール面には円周方向の締付け力が必要となる。通常のガスケットは鋼などの堅い材料との接触面でシール面をなすが、この管軸方向に沿うシール面では、両側の半割ピースの溝にはめ込まれたガスケットどうしの接触面となる。

ガスケットは板状の素材から切出して図4.10のかまぼこ型に曲げ、ポリイミドに加工したガスケット溝にはめ込む。このため柔らかいことが必要であり、材質はバイトン（ゴム系ガスケット）とした。許容温度は約250°Cであるため、ある程度蒸気層から離した外側寄りに設置することとした。ゴム系であることから耐放射線性が低く、交換頻度はポリイミド本体よりも多くなると予想される。

図4.2に示すように、蒸気層の幅を一定に保持するためにスペーサを数ヶ所に設ける。

(3) 端部

一般部と異なるのはエンドプレートと接する側のフランジ部内面形状のみである。図4.3に示すように、エンドプレート側には突出しがなく、ガスケットも少し幅広のものを用いる。

(4) 熱膨張吸収部

ポリイミドの熱膨張率は表3.1に示すように配管よりも大きく、300°Cでは1m当たり約15mmの伸びを生じる。実際のポリイミド部の温度は100°C前後まで低下すると考えられるが、いずれにしろ配管とポリイミドの間には管軸方向の熱膨張差を生じる。これを吸収するために熱膨張吸収部を設ける（図4.4、図4.5）。

図4.11に熱膨張吸収部の説明を示す。熱膨張吸収用に±20mmの空間を空けてオスとメスを組み合わせ、滑らかに摺動させるためのステンレス製のシールリングを介して、その上下面をガスケットでシールする。同図下にあるように、オスと一般部のシール面には段差ができるため、間に同図中に示すスリット入りのガスケットを用いて防水する。

この吸収部には管軸方向の締付け力は不要であるため、オス、メスともフランジはなく、クランプも図4.8に示すように周方向の締込みのみに用いられる。

シールリングは半割形状ではないため、配管施工中にあらかじめ差込んでおく必要がある。

4. 2 曲管部

図4.12：曲管部断熱構造

図4.13：腹側ピース詳細

図4.14：背側ピース詳細

図4.15：曲管部ガスケット構成図

図4.12に曲管部の断熱構造を示す。直管部の半割分割が円筒を縦割りにした対称な分割であったのに対して、曲管では曲管の腹側（小曲率半径側、図4.12①）と背側（大曲率半径側、図4.12②）への非対称な分割とした。従って分割面は平面ではなく、曲管の中心線に沿った曲面（円筒面とその前後の直交する平面）となる。これは図4.15に示すように、ガスケットの向かい合う辺の長さが等しくなるようにするためである(*1)。これにより管軸方向のシール面は曲管の中心線に沿ったものとなる。両端のフランジの締付けにより、この曲線状のシールが機能するかを確認する必要がある。

*1：いわゆるモナカ状の分割、或いは縦割りでは分割面は平面になるが、ガスケットに長辺と短辺が生じるため製作が困難となる。

端部は一般部の端部と接続できるように同じフランジ形状とする。素材には角材を用い、外側の形状は角材のままとした。内側の形状も曲管外面形状に沿った曲面加工は困難であるため、直交する丸穴（半円）加工と、角を取るための丸穴加工によるものとした。このため、蒸気層幅は一部で6.5mmを上回ることになる。

4. 3 分岐部

図4.16：分岐部構造全体図

図4.17：主管部詳細

図4.18：枝管部詳細

図4.19：主管部ガスケット構成図

図4.20：主管部ガスケット詳細

図4.21：枝管部ガスケット詳細

主管と枝管は同口径の32Aとして設計した。分岐部も曲管部と同様に、ガスケットの成形が可能なように分割する。すなわち主管部（図4.16①）と、それに差し込む枝管部（図4.16②）に2分割し、更に各々を分岐平面で半割に分割（図4.17、図4.18）して、合計4ピースで構成する。外面は角材のままとするが、取合い法兰部は丸加工である。主管部の内面は同径の直交する丸穴（半円）加工と、内面コーナー部の角取り加工とする。分岐部の製作には $60 \times 155 \times 240\text{mm}$ のブロック材が必要となる。

主管部ガスケットは図4.19に示すように、直管部ガスケットの長手辺の片方に枝管貫通用の半円部を持つ形状である。これは板状の素材から図4.20の寸法に切出し可能である。また枝管部ガスケットは図4.21のように、主管ガスケットの半円部に差込む部分は面でシールする形状とする。以上で格納容器水に対するシールは成立するが、これも確認する必要がある。

5. 確認実験

5. 1 実験目的

上述した水中断熱構造の設計においては、蒸気層の対流伝熱と放射伝熱を無視し、対流の生じない厚さとして5mmを設定した。これらの伝熱は放熱量を増大するものであるため、設定した蒸気層幅において対流の生じないこと、または対流や放射が生じたとしても断熱性能を確保できることを確認する必要がある。これを簡便な断熱構造を製作して確認する。

5. 2 実験装置と方法

（1）実験装置

実験装置の仕様は次の通りとした。

- ①机上に乗る規模とする。
- ②配管－蒸気層－ポリイミド断熱材－格納容器水の一連の構造を模擬するために、これらを円筒同心形状に組立て、これを鉛直に配置して円周方向温度分布の生じないようにする。
また、加工を簡便にするために半割構造にはしない。
- ③口径32A配管を模擬した電気ヒータ（シーズヒータ）を加熱源とする。
- ④格納容器水（以下、CV水ともいう）は開放水面とし、温度制御は行わずに室温とする。但し、投込みヒータによる簡便な温度調整は行う。
- ⑤蒸気層幅（以下、gapともいう）を実験パラメータとし、設計基準の5mmを基本として2.5mm及び10mmの3種類とする。蒸気についての知見は見あたらないが、空気層の場合は幅約10mm以上で対流が生じ始める³⁾。そこで10mmをパラメータの値とした。2.5mmはより対流の生じにくい、薄い幅での確認である。ポリイミド幅は30mmを基本とする。
- ⑥計測は各部の温度及び放熱量（ヒータ出力）とする。

図5.1に実験装置全体図を示す。写真5.1に全体を示す

ポリイミドは蒸気層幅5mmの場合に、図5.2-1に示すように内径 $\phi 50$ ×外径 $\phi 120$ ×厚さ35mmとした。このときのヒータは図5.3-1に示す、外径 $\phi 40$ mmのものを用いる。これを基準にして蒸気層幅2.5mmの場合は外径 $\phi 45$ mmのヒータを別途製作し（図5.3-2）、内径 $\phi 50$ mmのポリイミドと組合わせる。蒸気層幅10mmの場合はポリイミドの内径を $\phi 60$ mmに拡大再加工して（図5.2-2）、外径 $\phi 40$ mmのヒータと組合わせる。内径の拡大加工があるために実験順序にも制約を受ける。

以上のパラメータと実験順序を表5.1に示す。

尚、このようにしたのはポリイミド素材寸法の制約（内径 $\phi 48.2$ ×外径 $\phi 124$ ×長さ204mm:1本）とヒータ製作の容易さによる。

ポリイミドの長さについては、半径方向温度分布に注目する実験であるために、軸方向長さはそれほど必要ではなく、素材寸法の200mmで十分と判断した。この長さと32A配管の許容放熱量560W/mより、ヒータ出力は112W以上必要となるが、最大で133W（ $\phi 45$ mmのヒータは150W）とした。

ポリイミドは図5.1の部品15、24のガイドで支持し（図5.8）、4章図4.1に示したエンドプレートは設けない。熱膨張は図5.1、D部詳細に示すように、スプリングを介して上方に逃す構造とした。

図5.2-1(1/2)に示すように、上下端近くにCV水との連絡口を設けて、水張り時の導水とエアベントに用いる。実験中には下側は施栓し、上側はチューブを取付けて先端にコックをつけ、それを閉止して密閉した。これらの栓や熱電対用ノズル、ヒータ蓋（図5.9）もポリイミド材で製作した（図5.1部品30, 19, 21）。

ポリイミド上下端には断熱材を敷き、軸方向への放熱を防止する（図5.1部品13, 23）。

図5.4に弁を示す。ポリイミドで製作することは困難であるためSUS製とした。3.2節(1)で説明した弁座スリットは設けないが、これはスリットが外圧負荷時の用途であるのに対して、本装置では外圧は負荷しないためである。

CV水槽の胴は図5.5に示す、口径400AのSUS配管とした。CV水は満水で約22kgとなる。この胴の上下にフランジを溶接し、各々底板（図5.6）と上部蓋（図5.7）をボルトで取付ける。但し実験においては上部蓋は使用しなかった。これはポリイミド本体を目視できず、弁からの蒸気放出も観察できないことによる。

図5.10に制御盤を示す。ヒータの温度制御はPID制御による。

計測は熱電対10点、ヒータ電力及びCV水温である。熱電対計測点を表5.2に示す。このうちch.4～9は軸方向中心位置での半径方向温度分布の計測であり、ヒータ出力とともにレコーダに記録した。ch.5（ヒータ外筒内面）は配管温度としてパラメータの一つとした。このほかの熱電対は軸方向に異常な分布となっていないことのチェックにのみ用いた。

ポリイミド部の熱電対は図5.2に示すように、 $\phi 1.5\text{mm}$ のドリル穴に外側から $\phi 1.0\text{mm}$ のシース熱電対を差込み、押し当てた。内側計測位置は内面より 2mm 、外側計測位置は外面より 5mm 、各々ポリイミド内である。

内径拡大加工により内側熱電対用の穴が貫通してしまうが、これは栓で蓋をして、違う円周位置に開け直した（図5.2-2）。但しch.8（ポリイミド肉厚中心中央）用の穴は開け直しをしないため、蒸気層幅 10mm 実験時には肉厚中心より 2.5mm 内側にずれることになる。

CV水温は棒状温度計の目視計測であり、CV水槽の半径方向中心、軸方向中央位置に設置した。

（2）実験方法

表5.1の各蒸気層幅について、配管温度（ch.5）を7通りに変えて各々の定常温度分布を得る。最初に行う蒸気層幅 5mm の実験時に得られた配管温度を、他の蒸気層幅の実験でも再現するようにヒータを手動制御した。CV水温についても投込みヒータを用いて極力 5mm 実験時の温度に近づけた。但し水槽の攪拌は行わなかった。

CV水面はポリイミド上端面より 3mm 下までとした。

5. 3 実験結果と評価

（1）放熱量

表5.3に実験結果の一覧を示す。

図5.11に定常時の配管温度と放熱量、すなわちヒータ出力との関係を示す。

図の配管温度は表5.2に示すように、ヒータ外筒の内面の温度（ch.5）であるが、肉厚が 1mm と薄いため、外面までの間の温度低下は無視できる。そこでこれを配管温度とした。

図より配管温度の増加とともに放熱量は増大するが、その増加率は蒸気層幅の薄いほど大きいことが判る。

図には蒸気層高さ 140mm における許容放熱量 78W （表2.1、 $560\text{W}/\text{m}$ より）を破線で示す。蒸気層幅が 5mm と 10mm の場合はこれを下回っており、この構造が断熱構造として成立することが確かめられた。

実際の格納容器水温は実験よりも高い 60°C であることも、放熱を抑制する方向であり、断熱構造としての成立はより容易になる。また測定した放熱量には軸方向への放熱も含まれており、半径方向の放熱量はこれよりも低い値となるが、これも成立性をより高める。軸方向放熱量については後述する。

蒸気層幅 5mm と 10mm の放熱量は、配管温度が約 200°C 以上において、より対流の起きにくい 2.5mm よりも低い放熱量である。これから、蒸気層幅 5mm と 10mm のどちらにも対流は生じないと推定される。

配管温度が約 200°C 以下においては、放熱量に蒸気層幅及び配管温度による顕著な差は見られない。これはこの温度近辺の蒸気層はまだ蒸発中であり、水相と気相の二相状態で定常を維持し

ているためと考えられる。図5.12に蒸気層中央での計測温度と平均温度を示す。平均温度は配管温度とポリイミド内面温度の単純平均であり、後者のポリイミド内面温度はポリイミド内実測2点の温度より計算によって算出したものである。

図より、配管温度102°Cを除き蒸気層平均温度は100°Cを上回っているが、これも軸方向中心での温度であり蒸気層全体での平均ではない。このため、水相、気相各々の対流の発生有無は不明である。

(2) 温度分布

図5.13に定常時の各配管温度における半径方向温度分布を示す。

図中に示したように蒸気層幅とその位置はそれぞれ異なるが、ポリイミドの外径はどの蒸気層幅でも同じである。配管温度とCV水温は手動調整のため、蒸気層幅によって1~2°Cの相違が出た。また、各図にはポリイミド内面と外面の温度もプロットしてあるが、これらの値は実測2点(ch. 7とch. 9)の温度より、ポリイミド部のみの、熱伝導による対数温度分布曲線にフィットさせて算出したものである。CV水温は半径約130mm位置での1点計測値を、半径63mmと70mm位置での値として便宜的にプロットした。

一連の図より配管温度が高いほど、蒸気層の熱伝導率の低いことが効果を発揮して、蒸気層での温度降下量が大きくなり、全体の分布を鋭く折曲げることが判る（過熱蒸気の熱伝導率自体は温度が高いほどわずかに高くなる）。また、182°C以上の高い配管温度では、蒸気層幅2.5mmの場合にポリイミドがもっとも高温になり、この傾向は配管温度が高いほど顕著になる。これは熱伝導率の低い蒸気層であっても、ある程度の幅がなくては温度を落しきれないことを示している。一方、蒸気層幅が5mmと10mmではポリイミドの平均温度に大きな差は見られない(304°C、326°C)。

この蒸気層で落ちる温度差の、全体の温度差に占める割合を図5.14に示す。図の $\Delta \theta_s$ は配管温度-ポリイミド内面温度を、 $\Delta \theta_t$ は配管温度-CV水温を示す。

蒸気層が5mm以上の場合、配管温度300°C付近では全体温度差の70%近くを蒸気層のみで分担していることが判る。残りの約30%はポリイミド部の熱伝導とCV水境界の熱伝達であるが、後者の温度差は小さく、残り約30%の温度差の殆どはポリイミドが分担する。

配管温度の低い側では、水相の大きな熱伝導率が災いして $\Delta \theta_s/\Delta \theta_t$ は小さく、蒸気層(水相)を導入する効果は殆どないといえる。これは100°C飽和水の熱伝導率は0.68W/mKであり、同飽和蒸気の28倍も高いことによる。

また同図の蒸気層幅5mmと10mmを比較すると、 $\Delta \theta_s/\Delta \theta_t$ に大きな差はないといえる。従って熱伝導のみを考える場合であっても、蒸気層幅を不必要に増加する必要はないと言える。

以上のことから、300°C配管の断熱に5mmの蒸気層幅を用いることは適切であることが確かめられた。

図5.13から、同じ蒸気層幅の温度分布を抜き出して図5.15に示す。配管温度130°Cと258°Cの分布は図の煩雑さを避けるため省略した。図5.15各図から、CV水温が最大で9°C相違することを加味しても、配管温度が概ね300°C以上になると、ポリイミドの内側温度の急上昇する事が判る。図5.16にこのポリイミド内側温度をまとめて示すが、蒸気層幅2.5mmにおいて上昇が大きい。一方、図5.15-2と3からは、蒸気層幅が倍になってもポリイミドの温度分布は内側5mmを除いてほぼ同じであり、顕著な低下は見られない。但し、蒸気層幅5mmのときにこの内側5mmはポリイミドであり、同10mmのときは蒸気層である。

ポリイミドの温度は低いほうが望ましいが、上記のことから蒸気層幅を10mmに広げても、ポリイミド温度を低下させる効果は少なく、従って蒸気層幅は5mm程度が妥当であることがここでも確認される。

尚、図5.15-1の241°Cにおける内面付近の不連続は、ポリイミド部のみを考慮した計算値が蒸気層温度を上回ったものであり、実際の分布は外側に向って滑らかであると考えられる。

(3) 温度履歴

図5.17に温度履歴の例として蒸気層幅5mm、配管温度304°C（ケース20）のチャートを示す。

蒸気層(ch.6)が104°Cで蒸発し始めると、蒸発熱を奪われるためにヒータ温度(ch.4)の増加率は鈍り、配管温度(ch.5)も一時的にほぼフラットになる。その後過渡的に温度が低下した後、106°Cの一定温度になるが、この時の水面はch.6位置よりも下に下がっていて、この付近は安定した蒸気層になっているものと推定される。

蒸気層が120°Cを越えた時点で弁より気泡が流出すると同時に、温度が急激に低下する。音も発生した。この温度の低下は、開いた弁がバネ力で閉まるまでの間にCV水が流入したためと考えられる。尚、この時の蒸気層平均温度は209°Cである。

弁は0.01MPaの差圧で開くようにバネを設計してある。

このケースでは流入（弁開）は1回だけであり、その後134°Cまで上昇しても流入は生じずに安定した。しかし他のケースでは流入と蒸発を繰返すために定常が得られない場合もあり、一度も流入を生じない場合もあった。尚、このケースでも降温時に再び流入が生じたが、やはり120°C付近まで下がった時点であった。

このように弁には弁開圧力の高いことと、弁開時のCV水の流入という問題点があるが、定常が得られた場合には弁閉状態であり、そのデータは有効であると判断した。

(4) 評価

蒸気層に対流が生じているか否かを、熱伝導による放熱量との比較で検討した。

図5.18に蒸気層幅5mmの全放熱量（図5.11の再掲） q_t と、ポリイミドの測定温度から、熱伝導のみを考慮して算出した半径方向放熱量 q_p を示す。算式は次式による。

$$q_p = \frac{2\pi\lambda_p L}{\ln(r_o/r_i)} (\theta_{pi} - \theta_{po}) \quad (1)$$

ここで、

q_p : ポリイミド半径方向放熱量 (W)

$\lambda_p = 0.35$: ポリイミド熱伝導率 (W/mK)

$L = 0.14$: ポリイミド軸方向長さ (但し蒸気層と重なる長さ) (m)

$r_o = 0.06$: ポリイミド外半径 (m)

$r_i = 0.025$: ポリイミド内半径 (m)

θ_{pi} : ポリイミド内面温度 (測定温度からの計算値) (°C)

θ_{po} : ポリイミド外面温度 (同上) (°C)

図から、ポリイミド半径方向放熱量 q_p は全放熱量 q_t の 33~47% である。ポリイミド部分には対流や放射は存在しないので、 q_p が断熱構造全体の半径方向放熱量であると見なせる。従って、 $q_t - q_p$ が軸方向に逃げた放熱量となる。 q_p は許容放熱量を大きく下回っており、その 30% 以下である。

図には、図 3.3-1 と同様の計算値を q' として示す。すなわち蒸気層においては熱伝導のみが生ずるものとして、ポリイミド外面温度を仮定し、ポリイミド外面熱伝達率、全体熱通過率を得て、仮定した温度につき収束計算させた放熱量である。但し、図 3.3-1 と異なり、実験装置の諸元、測定した配管温度及び CV 水温を用いた。また蒸気層の熱伝導率には蒸気層平均温度における、圧力 0.1 MPa の過熱蒸気の値を用いた⁶⁾ (但し配管温度 102°C のケースは蒸気層平均温度が 93°C のため、飽和水の値とした)。

この放熱量 q' が高温域において q_p とほぼ一致することは、3 章設計において、蒸気層を熱伝導のみとした前提が妥当であることを示している。また、同時に高温側では蒸気層に対流の生じていないことを示している。

尚、図 5.11において許容放熱量を超過した、蒸気層幅 2.5 mm の配管温度 304°C について q' を求めると 44 W となり、軸方向放熱量を除くとこの蒸気層幅でも断熱構造として成立することが判った。

低温側における q' と q_p との差異は対流の可能性を示す。

そこで、熱伝導と対流による伝熱をまとめて扱う算式によるチェックを試みた⁷⁾。その場合には、

$$Gr_s \cdot Pr < 1.0 \times 10^3 \quad (2)$$

を満たすと熱伝導のみの伝熱となる。

ここに、

$$Gr_s = g \beta s^3 (\theta_i - \theta_a) / \nu^2 : \text{グラスホフ数} (-)$$

$$g = 9.80665 : \text{重力加速度} (m/s^2)$$

$$\beta : \text{体膨張係数} (1/K)$$

$$\text{蒸気} ; \beta = 1 / (\theta_s + 273.15)$$

$$\theta_s : \text{蒸気層平均温度} (°C)$$

$$\text{水} ; \beta = (\rho_a - \rho_s) / [\rho_s (\theta_s - \theta_a)]$$

$$\theta_a : \text{蒸気層外面 (ポリイミド内面) 温度} (°C)$$

$$\rho_a : \theta_a における密度 (kg/m^3)$$

$$\rho_s : \theta_s における密度 (kg/m^3)$$

$$s = (r_a r_i)^{1/2} \ln(r_a/r_i) : \text{環状間隙の特性幅 (m)}$$

r_a : 蒸気層外半径 (m)

r_i : 蒸気層内半径 (m)

θ_i : 蒸気層内面温度 (配管温度) (°C)

ν : 動粘性係数 (m²/s)

Pr : プラントル数 (-)

物性値には θ_s における圧力 0.1 MPa の過熱蒸気の値を用いた。

配管温度が 241°C 以上の場合には判別式(2)を満足し、蒸気層には対流は生じないという判定であった。その時の放熱量は(1)式と同様の熱伝導による算式であり、結果も q' とほぼ同じであった。

これよりも低温側の配管温度でも(2)式を満足するが、放熱量は q' よりも更に小さく、 q_p との差はより大きくなる傾向であった。対流は温度が低くてより起りにくいため、この原因は水相の存在による大きな熱伝導によるものと考えられるが、水位が未知であるため詳細は不明である。

尚、配管温度 102°C の q' は水相の熱伝導のみの放熱量であるが、(2)式の判定は満足せず水相における伝導と対流の発生域となり、参考文献⁷⁾による放熱量は 243W という大きな値であった。ここには逆に水相だけではなく、より放熱量の小さい蒸気層の存在する可能性がある。

以上のことから、配管温度が低く水相が存在する場合には水相の対流も考えられるが、配管温度が約 250°C 以上であれば蒸気層に対流は生じていないと言える。

尚、放射による放熱量は配管温度約 250°C 以上では生じていてもごく僅か、すなわち q_p と q' の差分であり、設計上は無視しうると言える。配管温度のより低い側では放射は更に小さくなる。

6. まとめと今後の課題

(1) 二重管とベローズによる完全密閉方式に替わる、配管の水中断熱構造を検討した。

過去の実験結果から、格納容器水により配管と断熱材の間に蒸気層を形成して断熱する方式を採用した。

蒸気層は格納容器水との出入り口を 1 力所に限定することで水流入 → 蒸気流出 という流路の形成を防ぎ、かつ配管との熱膨張差を逃すことのできる構造とした。

蒸気層を形成する断熱材料には耐熱性とともに耐水性も要求される。そこで耐放射線性にも優れた高分子材料であるポリイミドを採用し、許容放熱量以下の断熱構造の得られる見通しを得た。すなわち、熱伝導率が一般保温材よりも約 1 衍大きいポリイミドを用いても、蒸気層の低い熱伝導率の効果と、一般的のプラントよりも大きい許容放熱量とによって、現実的な厚みとすることが可能となった。またそのことにより蒸気層の厚みも対流を生じない厚さに抑えることができた。

(2) 上記の方針による詳細構造設計を直管、曲管、分岐管の各一例について実施し、製作の見通しを得た。 I S I 性の要求からフランジとシール材を用いた分解可能な構造とし、また配管据付

後での取付を可能するために半割構造とした。半割への分割においては、ガスケットを板状のシール材より切り出すことの可能な分割方法を工夫した。

(3) この断熱構造が基本的に成立するか否かを確認するために、簡便な実験装置を製作して放熱量を測定した。その結果、半径方向の放熱量は諸設計値を決める際の予測値とほぼ一致し、許容放熱量を十分余裕をもって満足できることが判った。これは蒸気層幅の2.5、5及び10mmについて成立つ。また、温度分布の測定からは、配管温度が約250°C以上になれば、蒸気層中に対流は発生しないこと、及び放射も極めて少ないことが確認された。

(4) 今後の課題

1) 各部の断熱構造設計

4章試設計に取上げなかった容器ノズルや弁等との取合い部、支持構造部などの詳細設計を実施する必要がある。

2) シール性能の確認

本断熱構造のシール面はガスケットどうしの面接触となる。これは通常のフランジにおけるガスケットとフランジ金属面（ガスケット座）との圧縮によるシールとは異なる形態である。このため、必要な圧縮力が得られるかをモックアップ等で確認する必要がある。特に管軸方向のガスケットや曲管、分岐管については、フランジから離れた中央部でも確実にシールされることを確認する必要がある。

また、ポリイミドの熱膨張を吸収する機構についてもモックアップが必要である。

3) ガスケットの交換周期

より耐放射線性の高いガスケット材料を適用して、ガスケットの交換周期を延長する必要がある。

4) 弁からの漏入

3章設計において弁座にスリットを設けるとしたことが、実験で見られたような格納容器水の蒸気層への漏入につながり、放熱量を増加させることのないことをモックアップ等により確認する必要がある。

謝辞

本設計研究を遂行するに当り、エネルギーシステム研究部落合部長をはじめ、多くの方々の協力を頂きました。また、同部将来型炉研究グループ主任研究員大久保努氏には、本報告書の執筆にあたり有益なご助言をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 原子力船研究開発室「改良船用炉MRXの工学設計」 JAERI-Tech 97-045(1997)
- 2) 日本原子力研究所「原子力船研究開発の現状」3.2.2深海船用原子炉(DRX)の設計研究(1995)
- 3) 相川 福寿「保温材の特性と応用」日刊工業新聞社(1963)
- 4) 日本材料学会編 先端材料シリーズ「照射効果と材料」裳華房(1994)
- 5) 日本機械学会「伝熱工学資料 改訂第4版」日本機械学会(1986)
- 6) 日本機械学会「技術資料 流体の熱物性値集」日本機械学会(1983)
- 7) ドイツ技術者協会(VDI)編,木内 学訳「最新熱計算ハンドブック」日本能率協会マネジメントセンター(1996),page.Fc1 “密閉流体層内の自然対流による熱伝達”, “垂直の環状間げき”

表 2.1 断熱条件の代表例

ケ-ス	原子炉・系統	口径(外径x肉厚) (mm)	材質	流体温度 (°C)	許容放熱量 (W/m)
①	MRX余熱除去系	50A(Φ 60.5x5.5)	SUS304TP	300	1330
②	MRX体積制御系	40A(Φ 48.6x5.1)	"	300	1069
③	MRX加圧器ブレイ系	50A(Φ 60.5x5.5)	"	320	133
④	DRX主蒸気系	32A(Φ 42.7x4.9)	"	300 ^{*1}	560

*1：主蒸気温度は242.4°Cであるが、ここでは300°Cで検討する。

表 3.1 ポリイミドと一般保温材の特性

特 性	①ポリイミド成形体 (製品名:ユピモール -R (宇部興産))	②珪酸カルシウム保温材 (JIS-A9510, 1号13及 びスーパーシリカ)	備 考
密度(kg/m ³) 室温	1400 ^{*1}	130以下	
熱変形温度(°C)	約360	1000	①:ASTM-D648法 ②:最高使用温度
熱伝導率(W/mK) 23°C 300°C	0.395 0.350 ^{*1}	0.044 0.079	
吸水率(%)	0.46	大	①23°Cx48h浸水後の水 重量／全重量比 ②別品ポリウレタンフォームで 約50 ^{*2}
耐放射線性(Gy)	約5x10 ⁶	不明	①参考文献 ⁵⁾ p.185 図3.12
引張強さ (MPa) 室温 300°C	114 ^{*1} 26 ^{*1}	0.6 —	②:圧縮強さ
曲げ強さ (MPa) 室温	161	0.2	
熱膨張率(1/°C) 300°C	5.5x10 ⁻⁵	収縮	SUS304は1.72x10 ⁻⁵ (327°C)

*1：実測による。他はメーカーCATALOG値、JIS規定値、文献による。

*2：日本ピツツバーグコーニング(株)、FORMGLAS Insulation Systems(カタログ)に記載の体積吸水率1.6%と参考文献⁴⁾ p. 57の換算式による。ポリウレタンフォームのかさ比重は同p. 113表47より0.03とした。

表 5.1 実験パラメータと順序

順序	ヒータ外径 (mm)	蒸気層幅 (mm)	ポリイミド		
			厚さ (mm)	内径 (mm)	外径 (mm)
1	φ 40	5	35	φ 50	φ 120
2	φ 45	2.5	35	φ 50	φ 120
				〈拡大加工〉	
3	φ 40	10	30	φ 60	φ 120

表 5.2 热電対計測点

ch.No.	設置位置	タイプ Xシス径	参照図面	配線図記号	備 考
4	ヒータ内筒	K-φ 1.6	図5.3-1, 2	ヒータ温度	ヒータ温度制御
5	ヒータ外筒内面	K-φ 1.0	“	T1-1	配管内面相当
6	蒸気層中央	“	図5.2-1, 2	T2-1	軸方向中心
—	ポリイミド 内側上部	“	“	T1-2	蒸気層上端の下20mm
7	“ 中央	“	“	T3-1	軸方向中心
—	“ 下部	“	“	T2-2	蒸気層下端の上20mm
8	ポリイミド 肉厚中心中央	“	“	T3-2	軸方向中心
—	ポリイミド 外側上部	“	“	T1-3	蒸気層上端の下20mm
9	“ 中央	“	“	T3-3	軸方向中心
—	“ 下部	“	“	T2-3	蒸気層下端の上20mm

表 5.3(1/2) 実験データ (定常時)

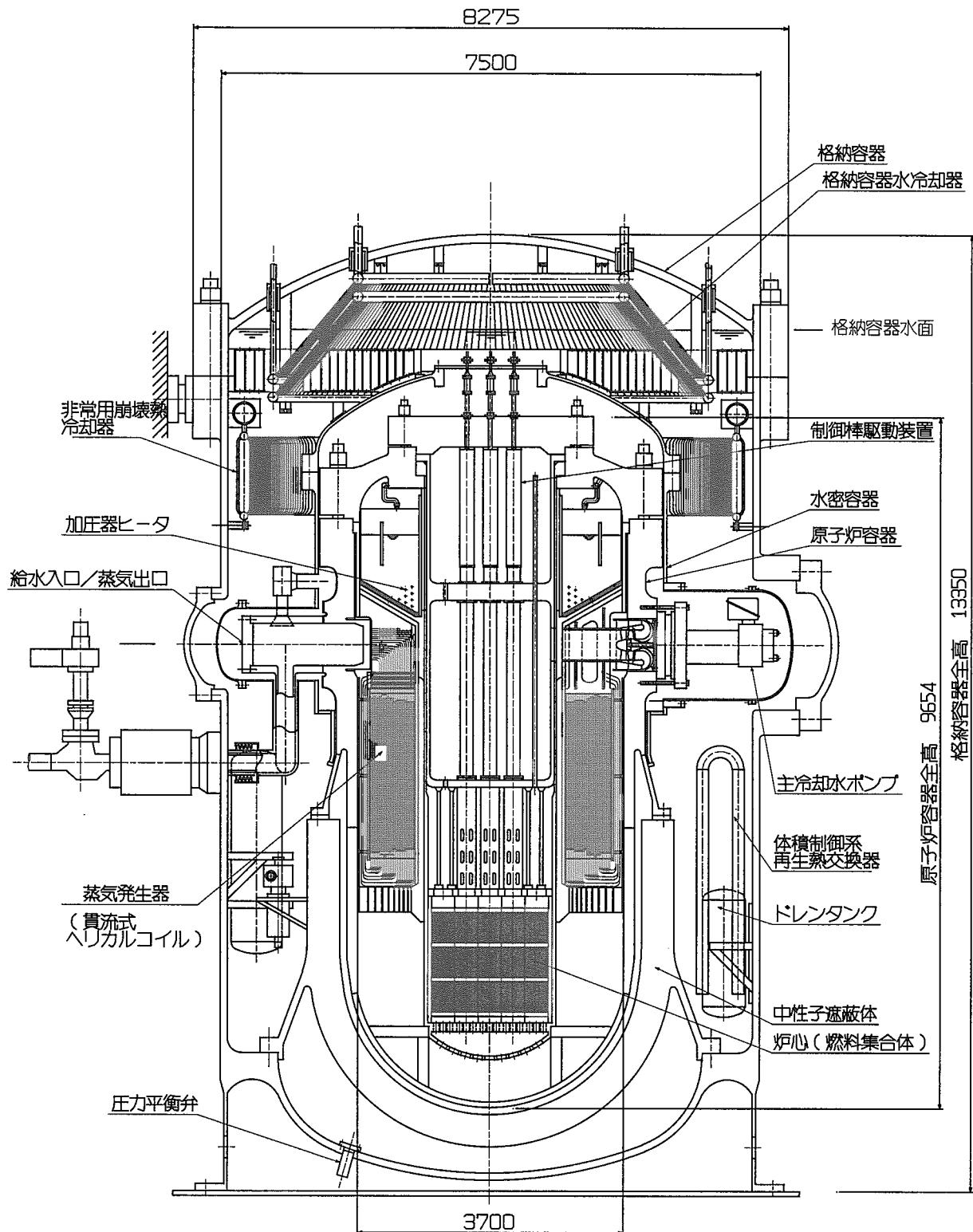
ケース No.	蒸気層 幅 (mm)	ヒータ設定値 (W)	ヒータ電力 (W)	ヒータ内筒 内面 (°C)	ヒータ外筒 内面 (°C)	ホリミト [°]		ホリミト [°]		ホリミト [°]		CV水温 (°C)
						内面 (°C)	中心 (°C)	内側中 (°C)	中心中 (°C)	外側中 (°C)	外面 (°C)	
<配管温度102°C>												
44	2.5	100	43.8	103	102	90	81.1	76	47	29	23.3	20
24	5	150	45.6	153	102	97	83.4	78	48	28	21.9	20
54	10	156	47.5	159	103	94	79.4	74	51	29	21.8	22
<配管温度130°C>												
41	2.5	122	50	126	132	99	89.2	84	53	36	30.1	26.5
21	5	200	46.3	203	130	93	80.5	76	52	34	28.9	26.3
51	10	214	56.3	217	128	94	81	76	54	34	27.3	25.5
<配管温度182°C>												
42	2.5	180	58.8	184	182	100	90.6	85	52	33	26.6	23.3
22	5	250	56.3	253	182	106	90.6	85	53	33	26.6	24
52	10	251	58.8	254	182	96	81.2	76	54	32	24.9	24.3
<配管温度241°C>												
49	2.5	242	93.8	246	241	108	111	104	61	39	31.1	29.2
19	5	300	66.3	303	241	108	93.5	88	57	37	30.8	29
59	10	301	65	303	243	108	91.6	86	62	39	31.4	29.3
<配管温度258°C>												
45	2.5	259	103.8	262	259	124	120	112	64	38	29	26
25	5	300	57.5	303	258	105	89.4	84	54	34	27.9	26
55	10	324	72.5	328	259	116	91.7	86	61	38	30.3	27
<配管温度304°C>												
40	2.5	311	105	314	304	162	154.8	144	78	44	31.8	29
20	5	350	73.1	353	304	134	113.2	106	66	39	30.8	28.8
50	10	357	73.8	361	304	114	94	88	63	38	30	29

表 5.3(2/2) 実験データ (定常時)

ケース No.	蒸気層 幅 (mm)	ヒータ設定値 (W)	ヒータ電力 (W)	ヒータ内筒 内面 (°C)	ヒータ外筒 心 (°C)	蒸気層 中 内面 (°C)	ボリイミド 内側中 (°C)	ボリイミド 中心中 (°C)	ボリイミド 外側中 (°C)	ボリイミド 外面 (°C)	CV水温 (°C)
<配管管壁温度326°C>											
43	2.5	335	115	338	326	178	168.1	156	83	44	30.3
23	5	375	80	378	326	146	123.2	115	70	39	29.7
53	10	380	80	384	328	127	103.8	97	68	40	30.8
<各蒸気層幅での半径値(mm)>											
	2.5				22.5	23.75	25	27	42.5	55	60
	5				20	22.5	25	27	42.5	55	60
	10				20	25	30	32	42.5	55	60

注1：ボリイミド内面、ボリイミド外面の”計算値”は実測2温度による対数曲線フィッティングによる。

注2：CV水温の半径値は温度分布グラフ作成時の便宜上の位置。



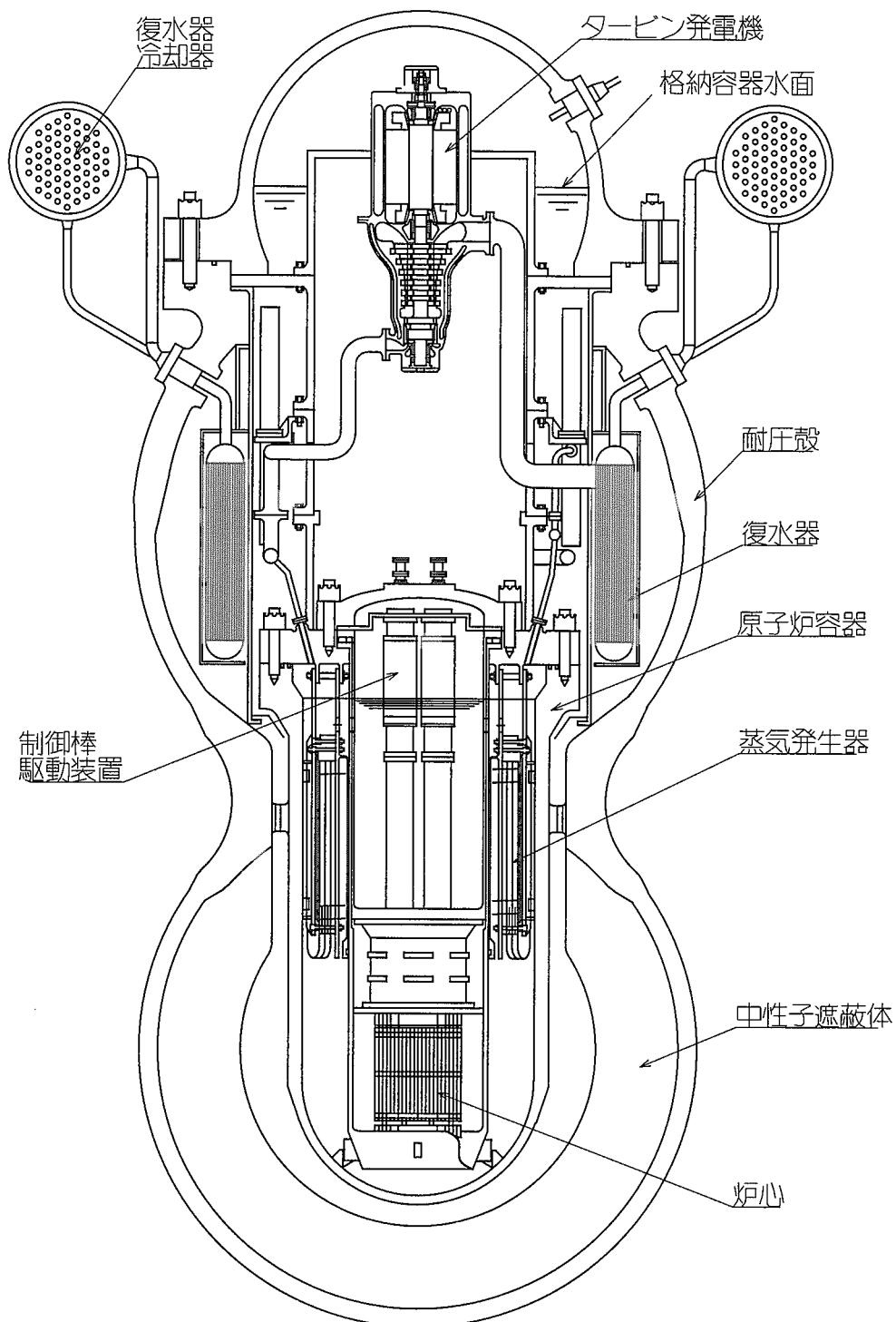


図 1.2 ORX全体構造図

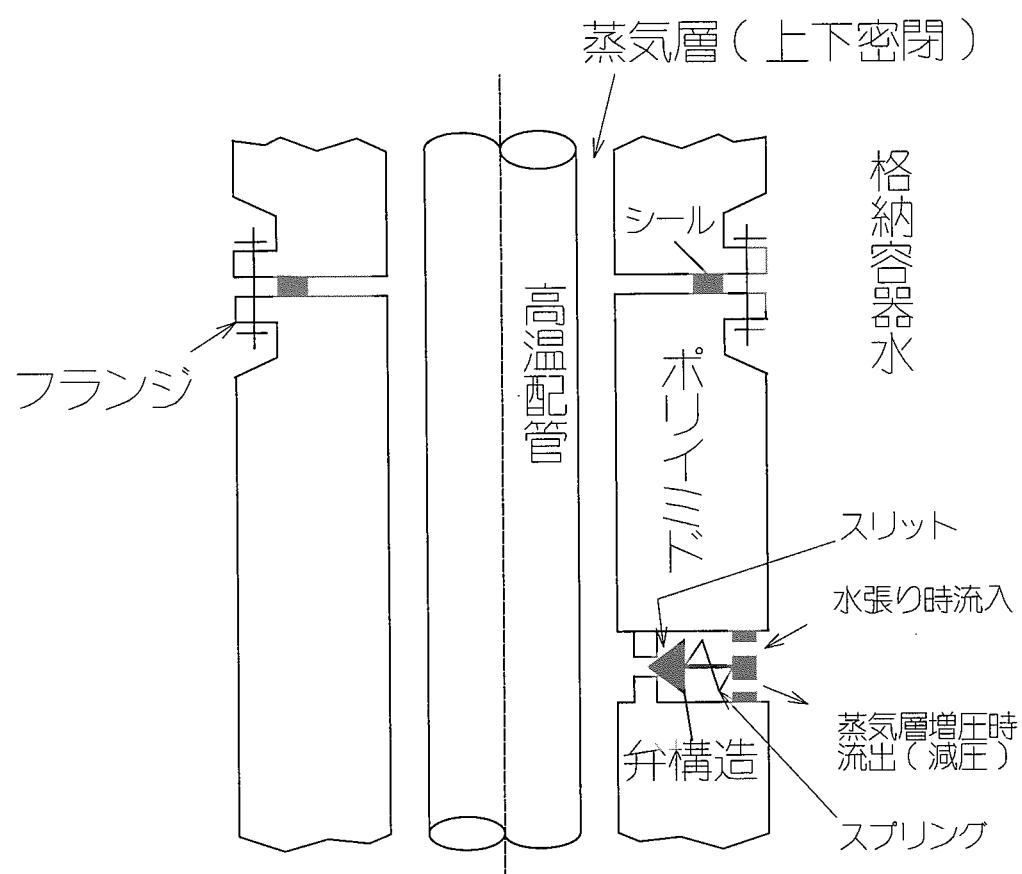


図3.1 水中断熱構造の概念

図 3.2-1 断熱材厚さと放熱量
口径32A,蒸気層なし

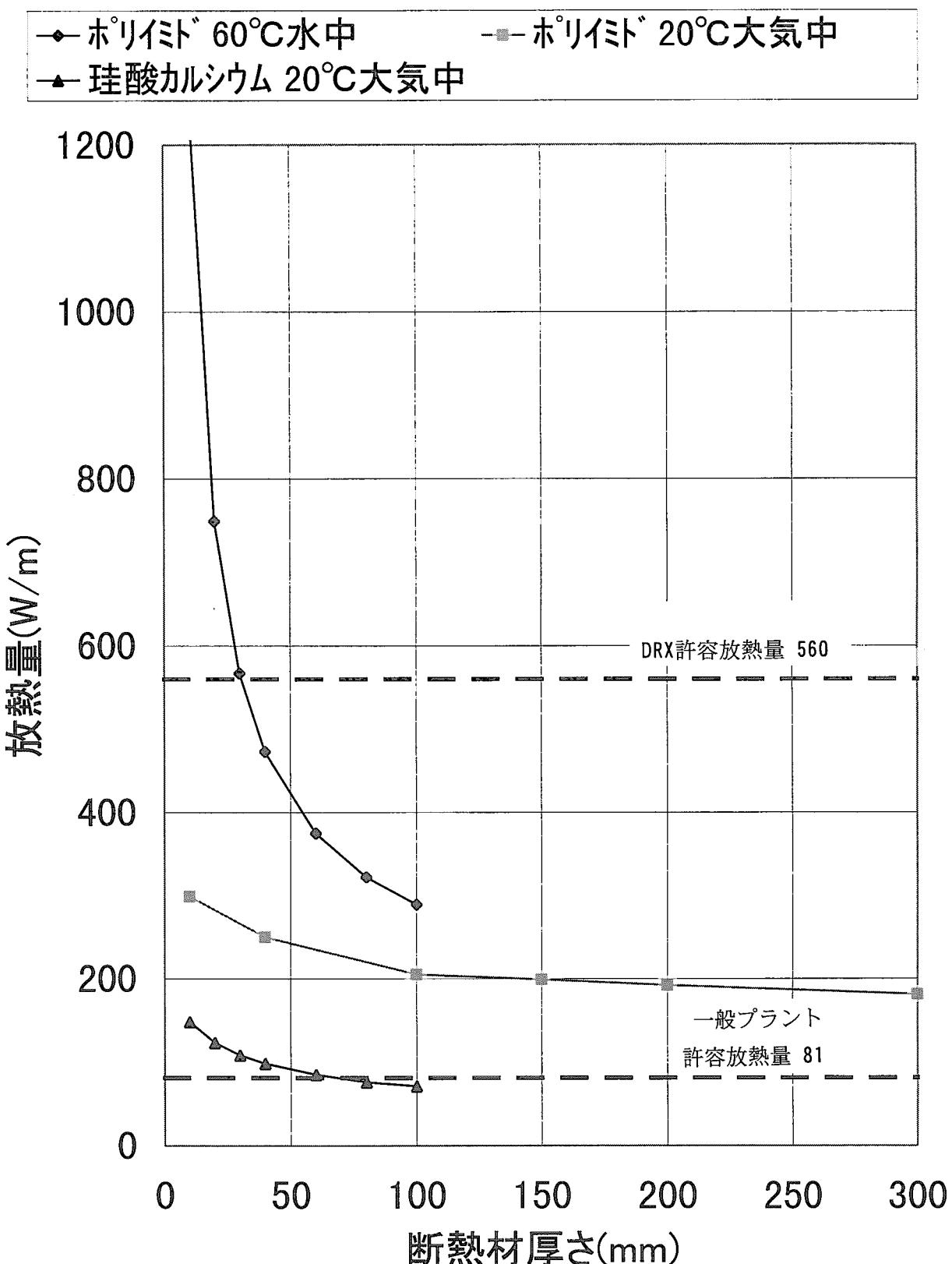


図 3.2-2 断熱材厚さと放熱量
口径50A,蒸気層なし

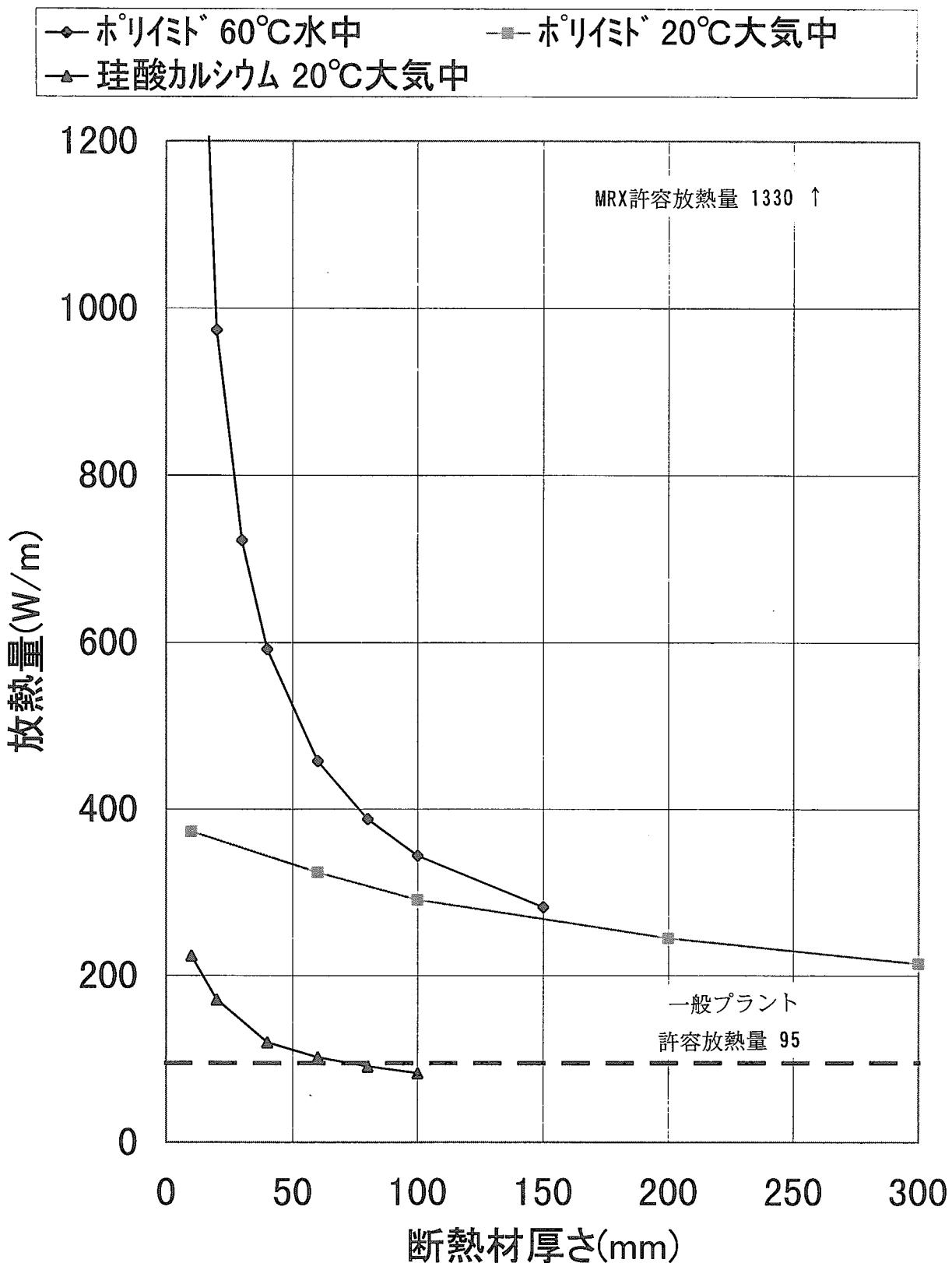


図 3.3-1 断熱材厚さと放熱量

口径32A,蒸気層あり

ts:蒸気層厚さ(mm)

◆ ts=2.5 ■ ts=5.0 ▲ ts=10.0

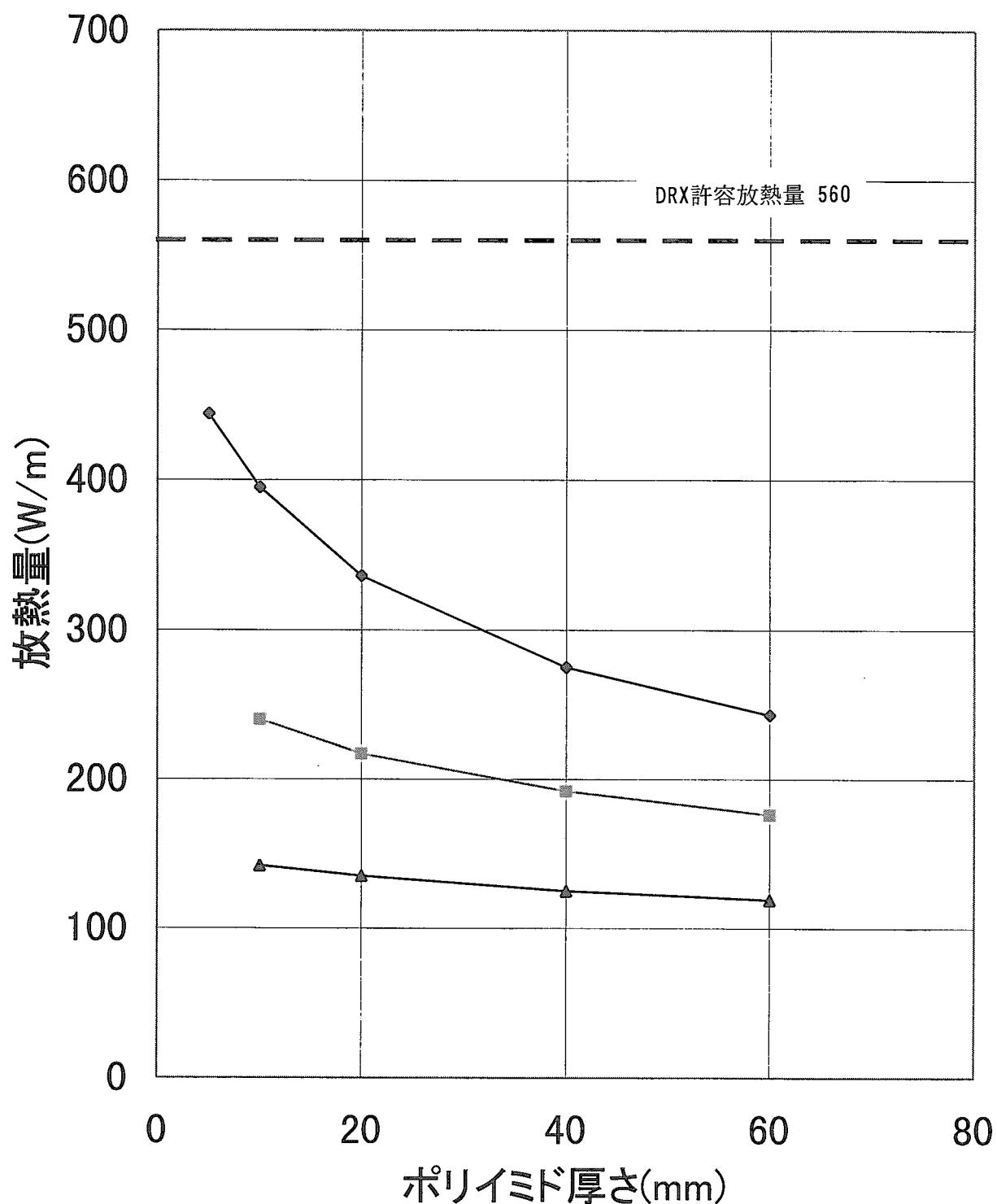
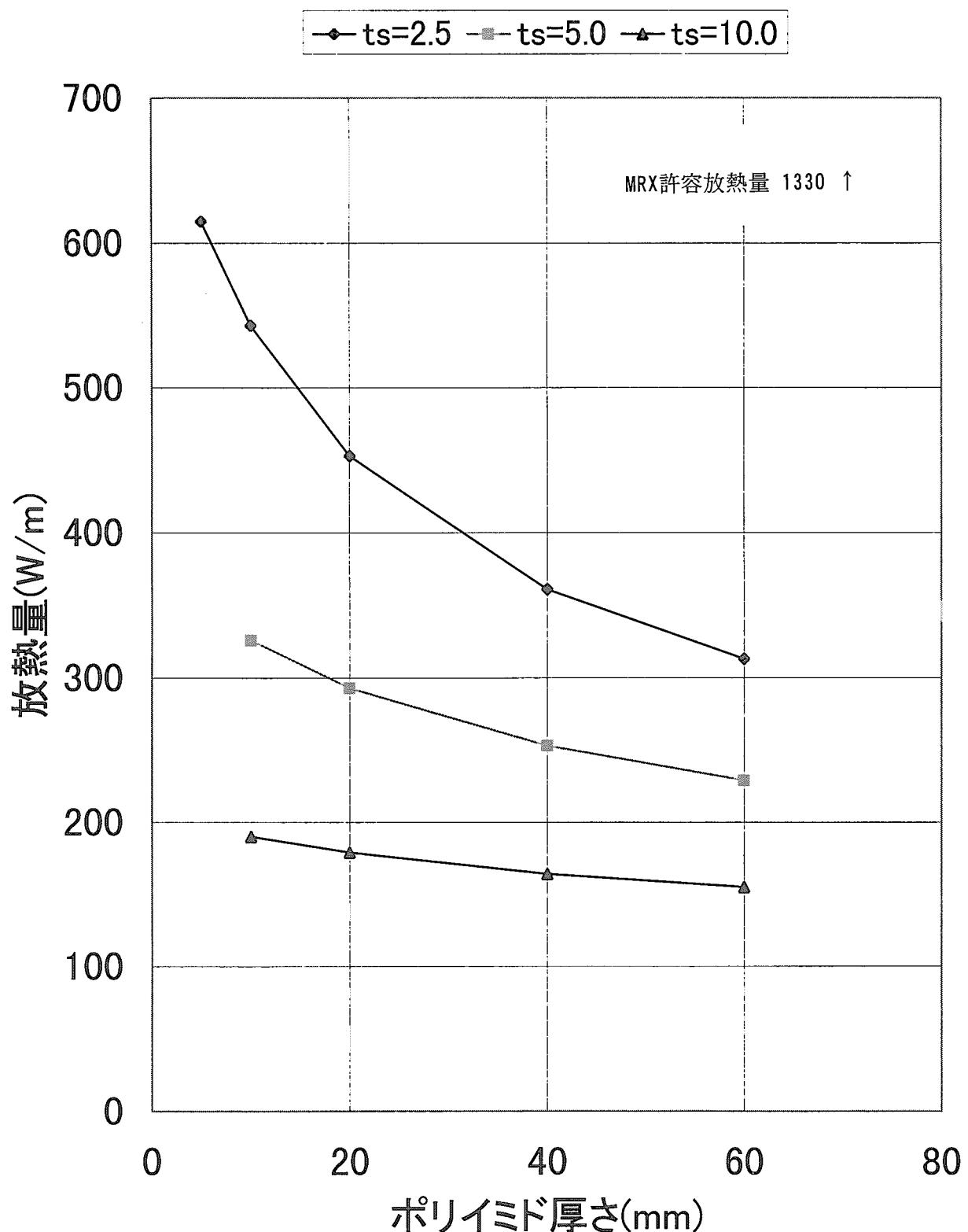


図 3.3-2 断熱材厚さと放熱量
口径 50A, 蒸気層あり
ts: 蒸気層厚さ(mm)



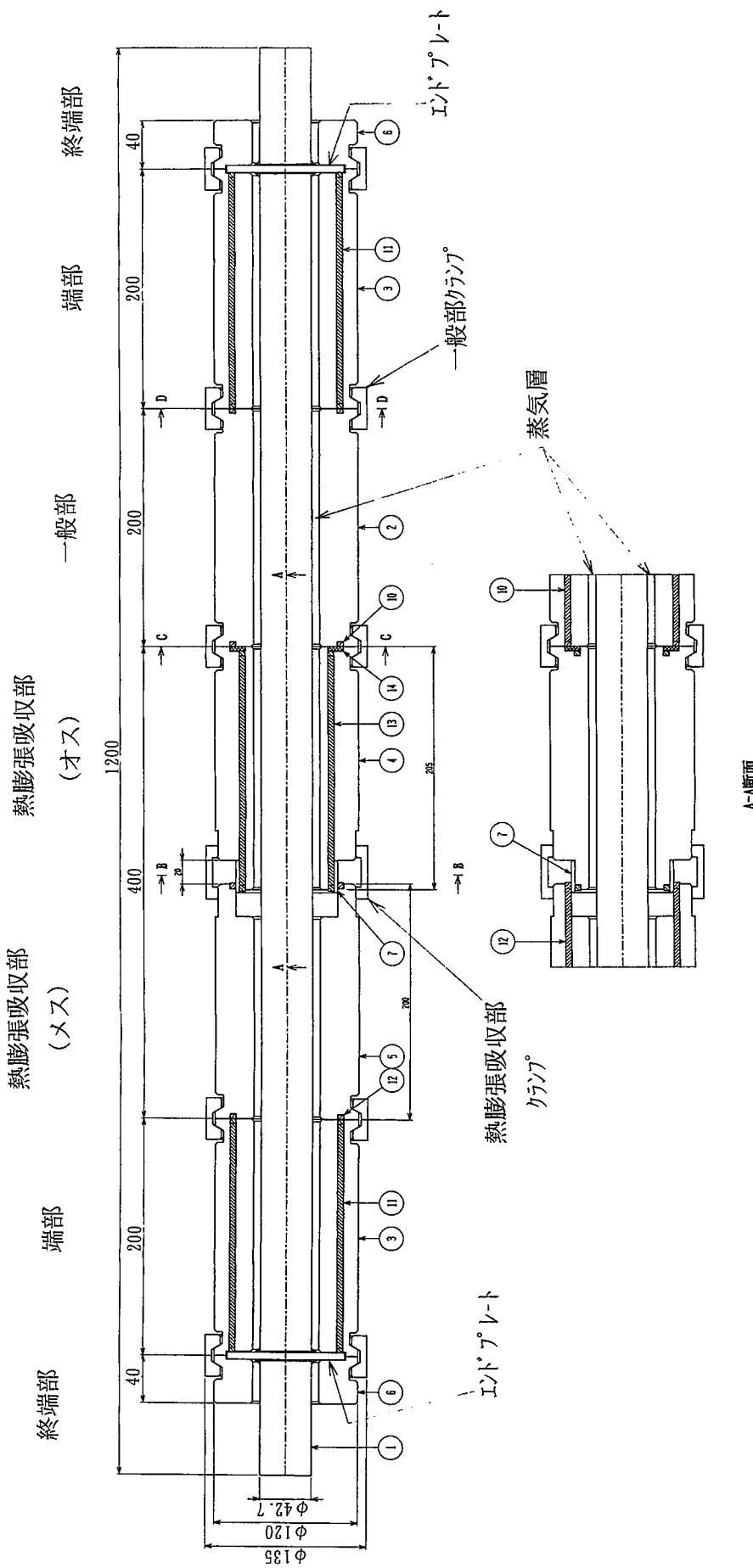


図 4.1(1/2) 断熱構造全体図

符号	名 称	数 量	材 质	符 号	名 称	数 量	材 质
①	配管 32A	1	SUS304TP	⑨	熱膨張吸収部クラシップ	1組	SUS304
②	一般部 断熱材	1対	ボリイミド	⑩	ガスケット	2	バイトン
③	端部 断熱材	2対	"	⑪	ガスケット	4	"
④	熱膨張吸収部 断熱材(オス)	1対	"	⑫	ガスケット	2	"
⑤	熱膨張吸収部 断熱材(メス)	1対	"	⑬	ガスケット	2	"
⑥	終端部 断熱材	2	"	⑭	ガスケット	1	"
⑦	シールリング	1	SUS304	⑮	ファスナー	6	SUS304
⑧	一般部クラシップ	5組	SUS304	⑯	皿小ネジ	36	SUS材

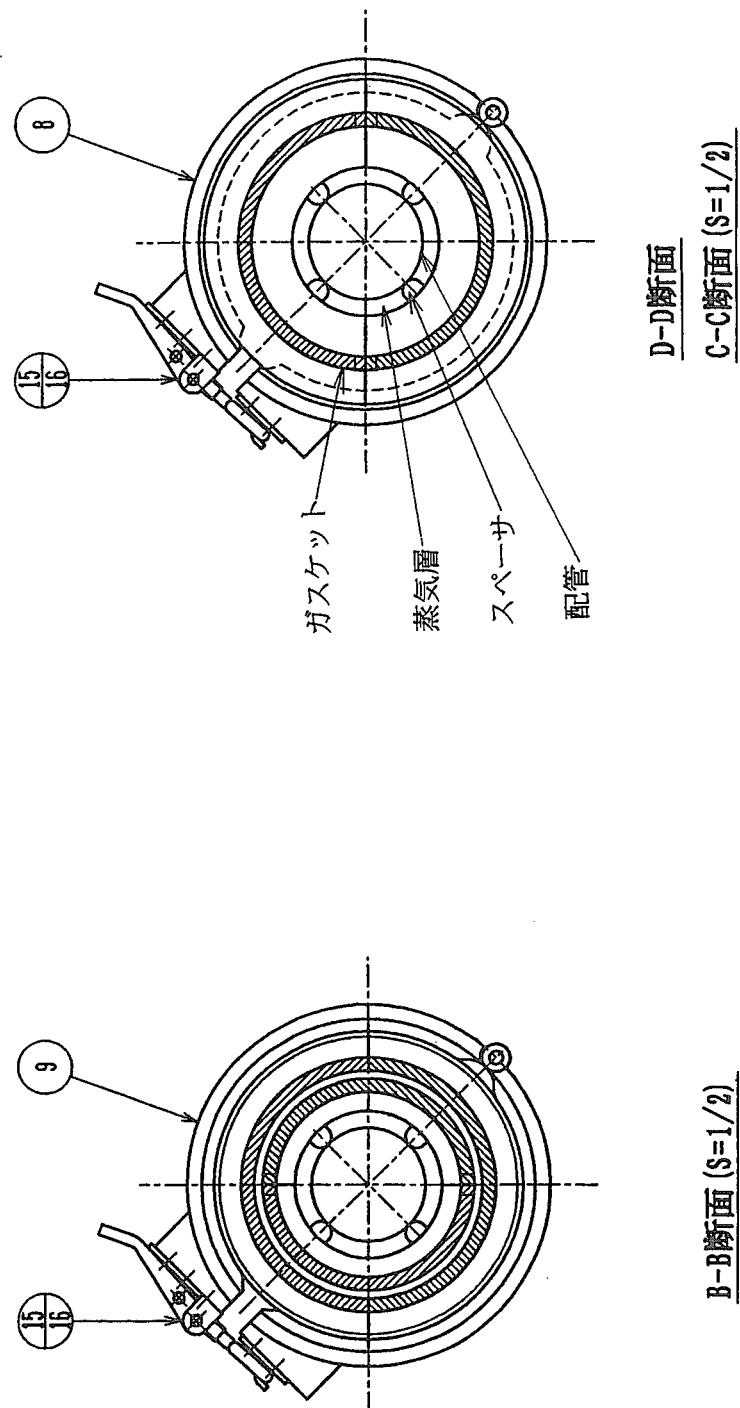


図 4.1 (2/2) 断熱構造全体図

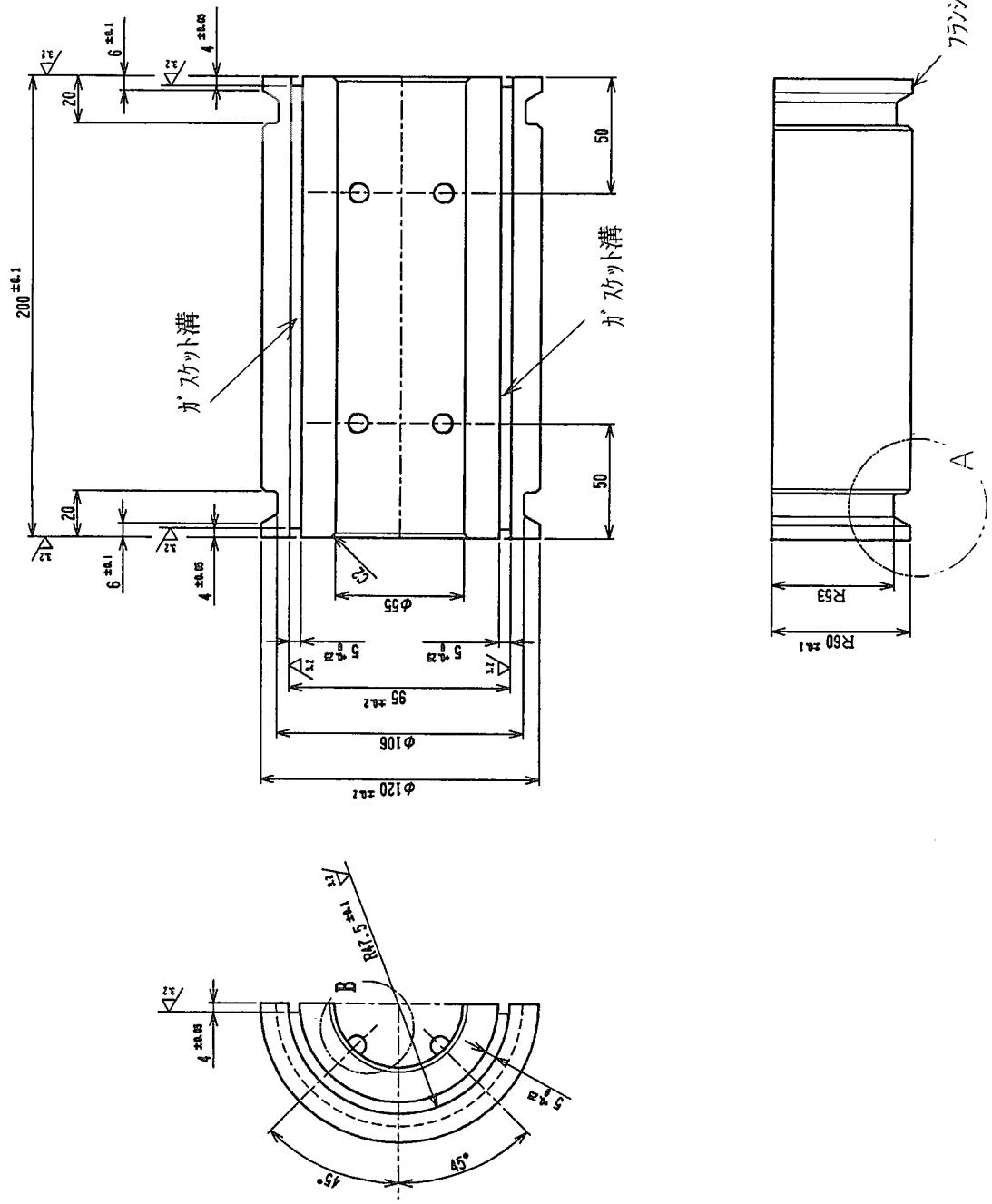


図 4.2(1/2) : 一般部詳細

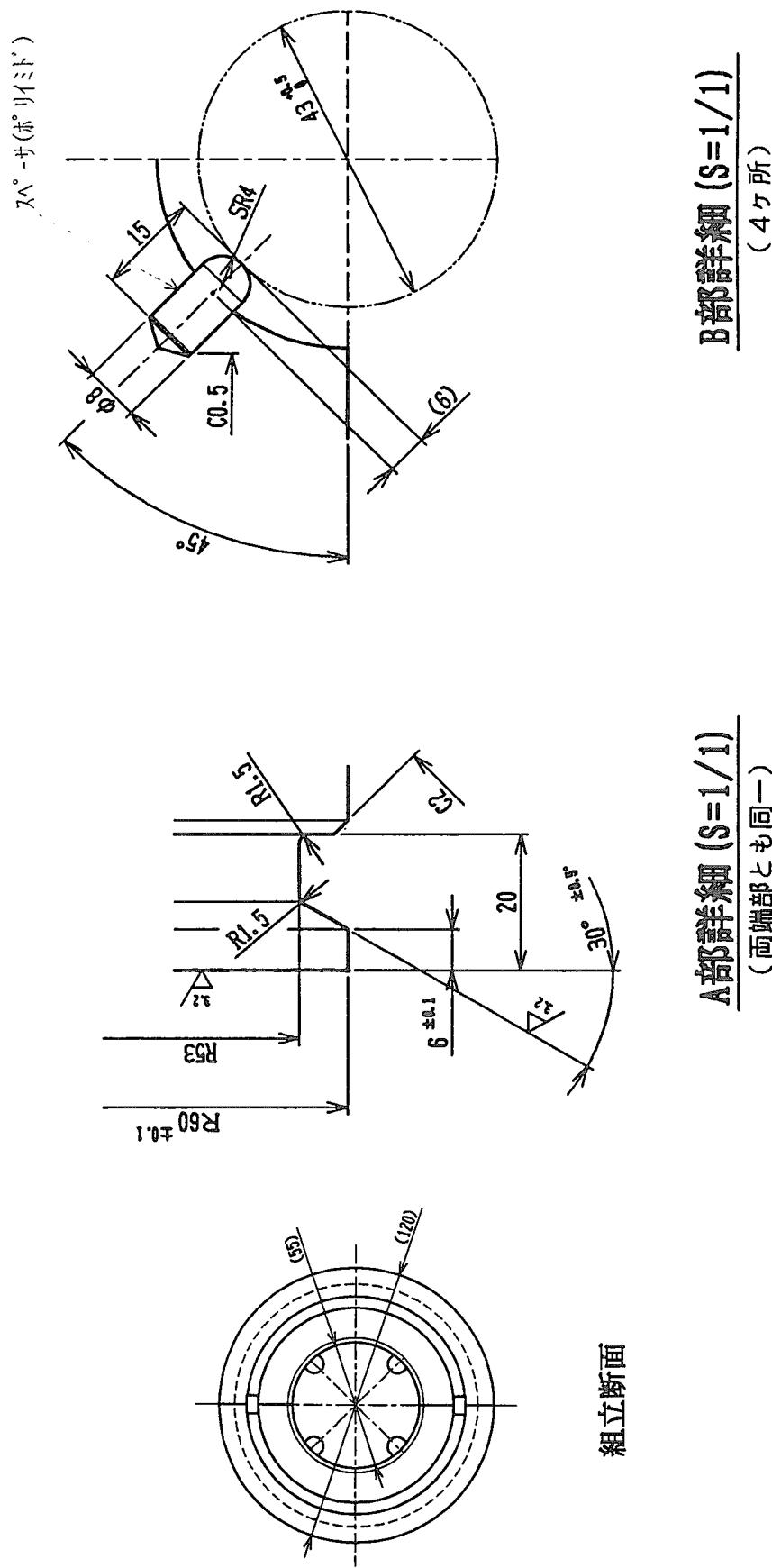


図 4.2(2/2) : 一般部詳細

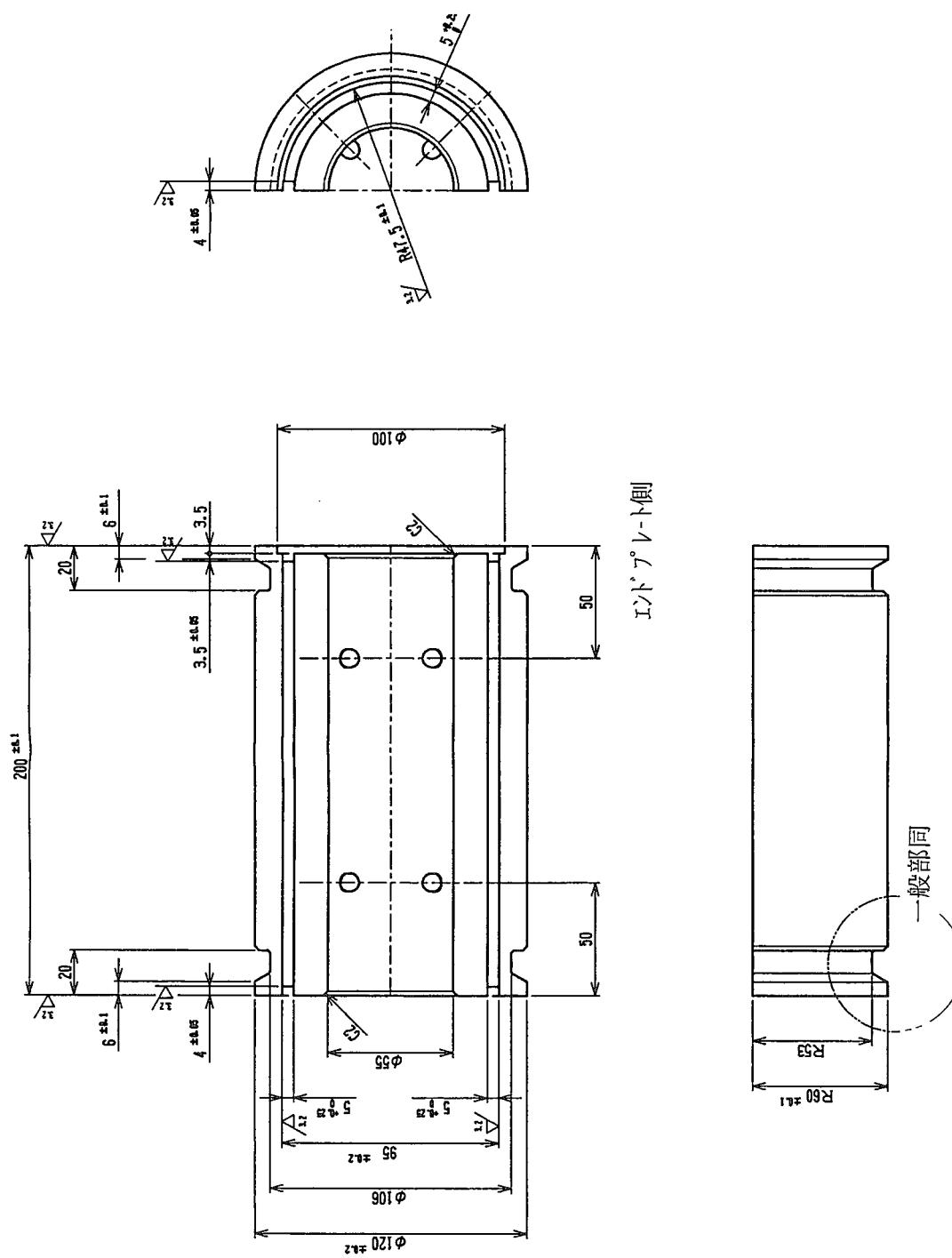


図 4.3 端部詳細

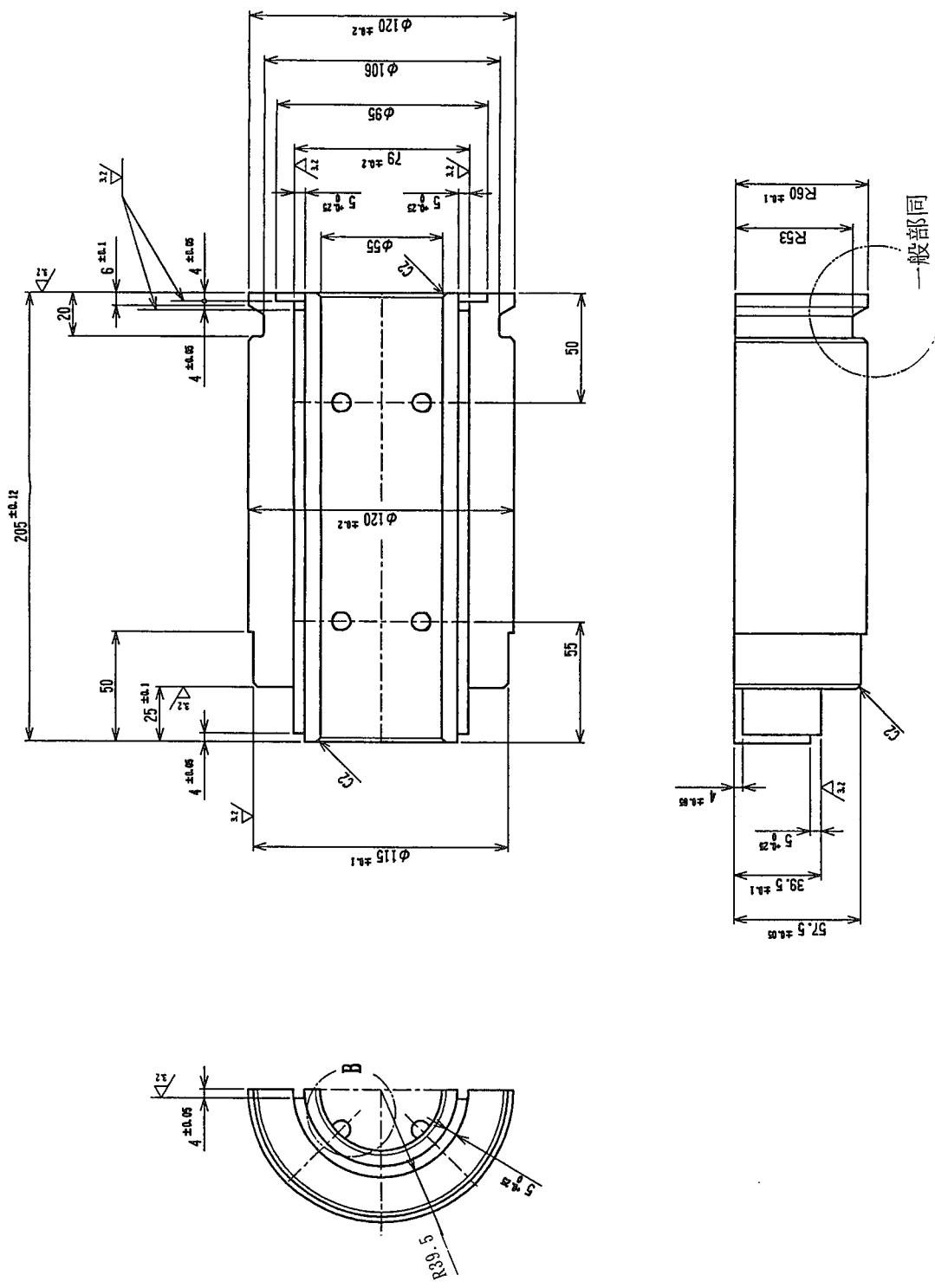


図 4.4 热膨張吸収部（才又）詳細

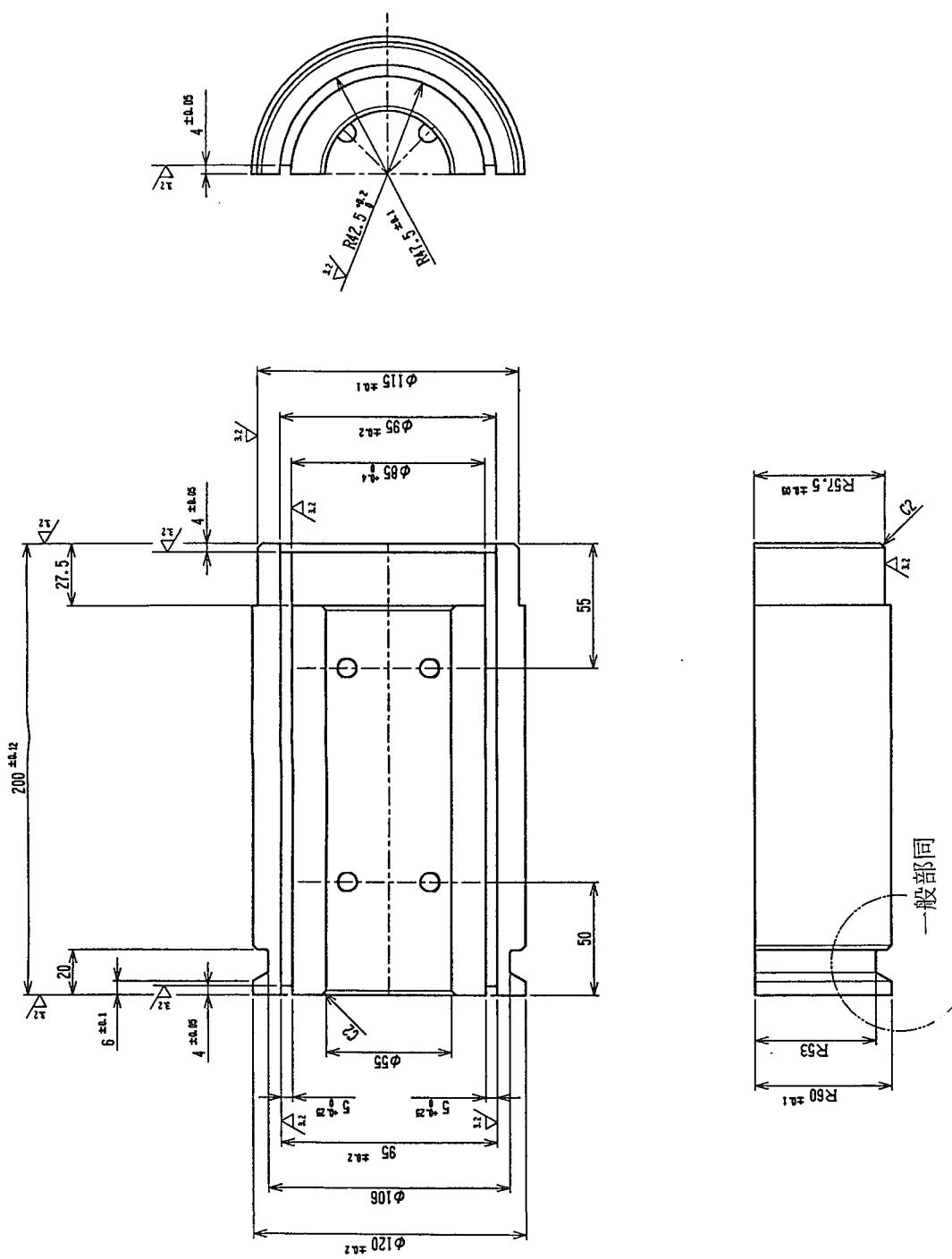


図 4.5 热膨張吸収部(メス) 詳細

A部詳細 (一般部同)

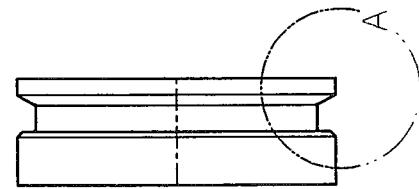
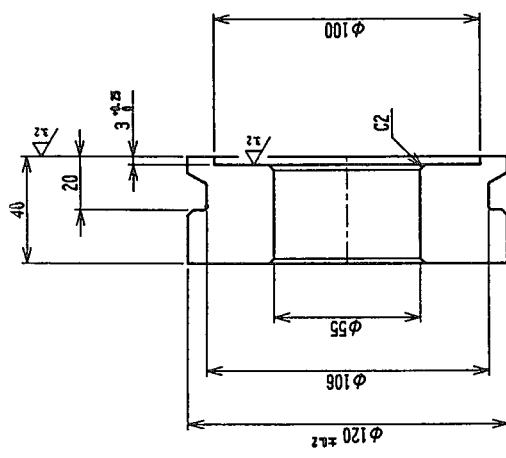
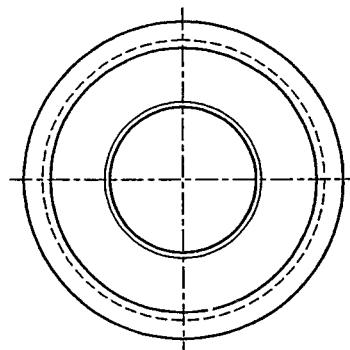
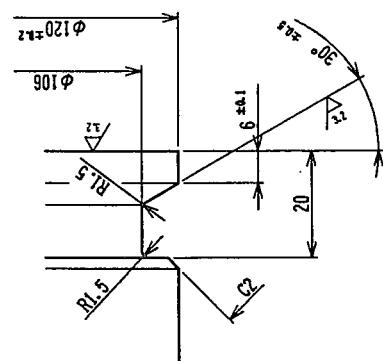


図 4.6 終端部詳細

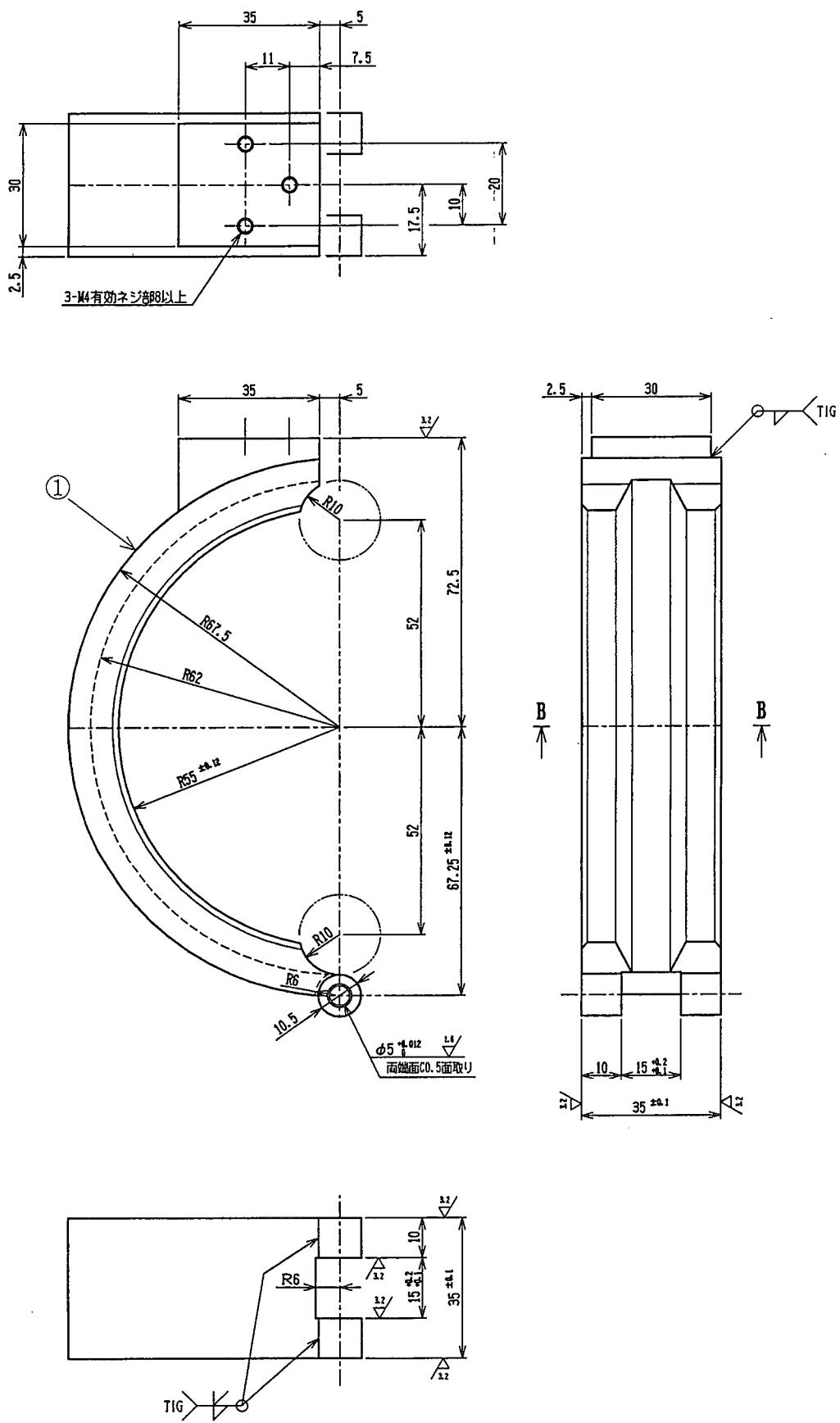


図 4.7(1/4) 一般部クランプ詳細

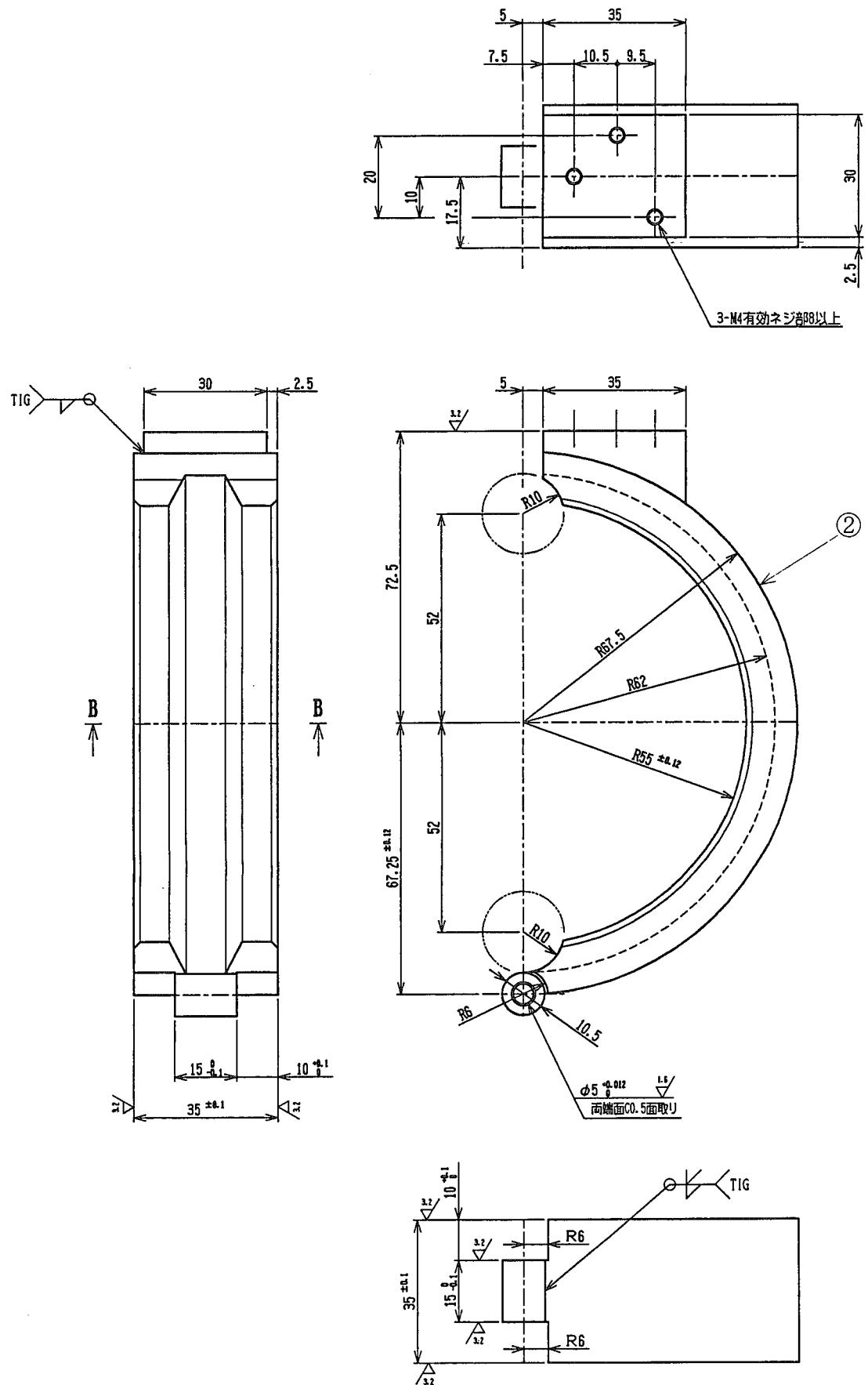
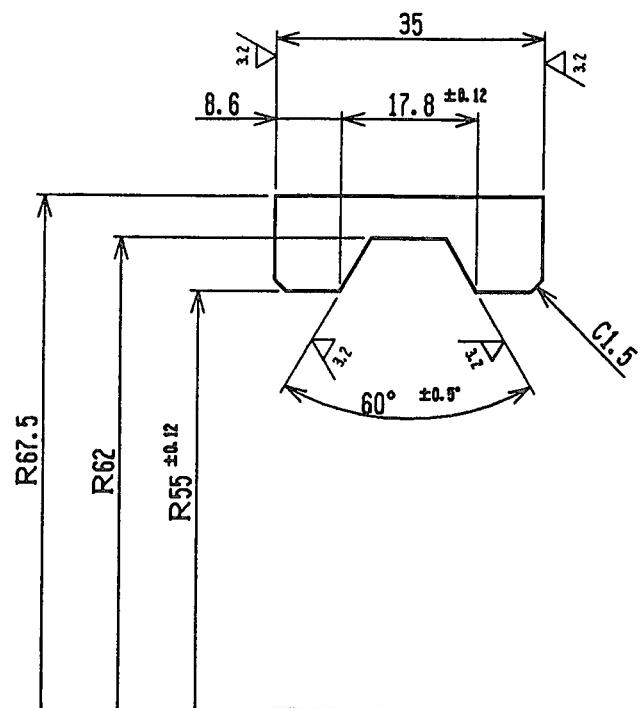
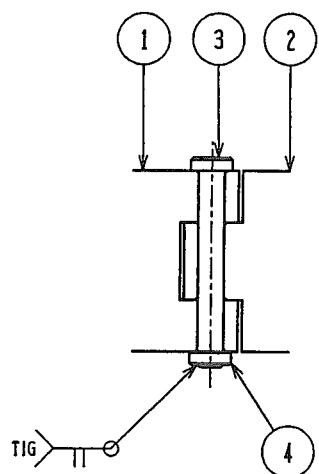
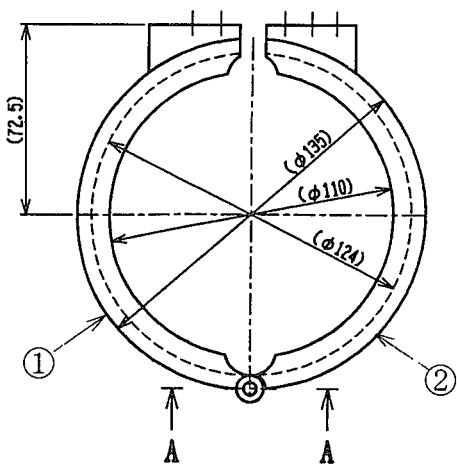
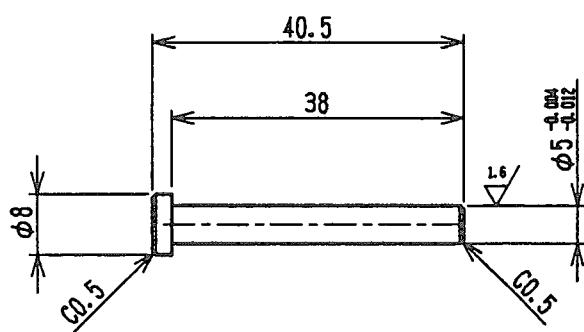
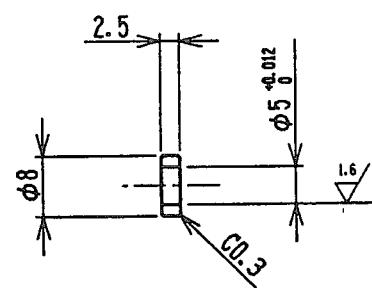


図 4.7(2/4) 一般部クランプ詳細

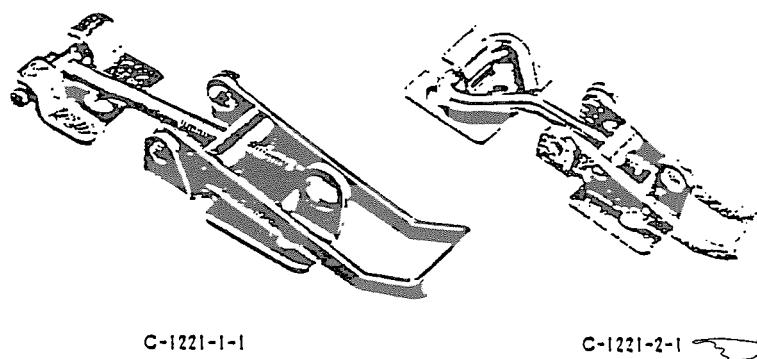
B-B断面 (S=1/1)A-A断面

③ヒンジピン



④カラ-

図 4.7(3/4) 一般部クランプ詳細

C-1221 ステンレスアジャスト ファスナー商品番号
C-1221-1-1商品番号
C-1221-2-1

- 仕様**
- 製品重量
C-1221-1-1 185g
C-1221-2-1 50g
 - 引張荷重
C-1221-1-1 100kg
C-1221-2-1 40kg
 - 材質
質：冷間圧延ステンレス板(SUS304)
 - 表面仕上
バッルド仕上
 - 特徴
・締めしのうの調整ができます。
・南京錠で固定ができます。
・耐環境特性が優れています。
 - 用途
特殊工具・工作機械・機器等
 - 調整工具品です。

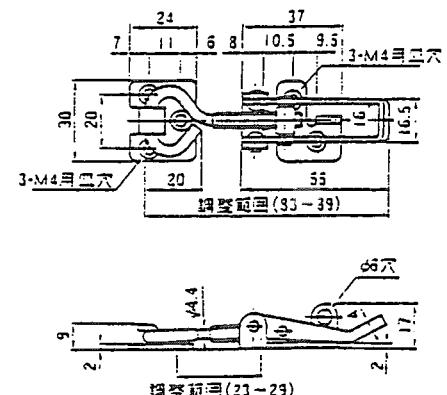
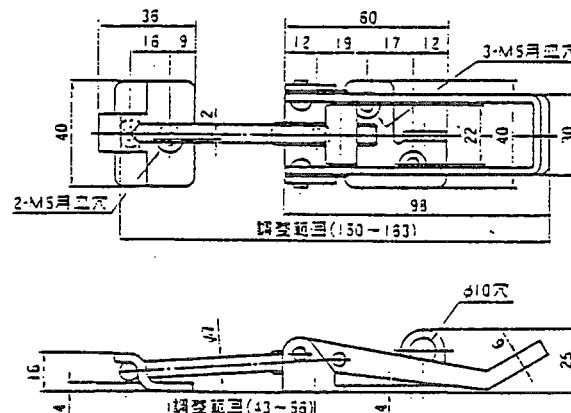
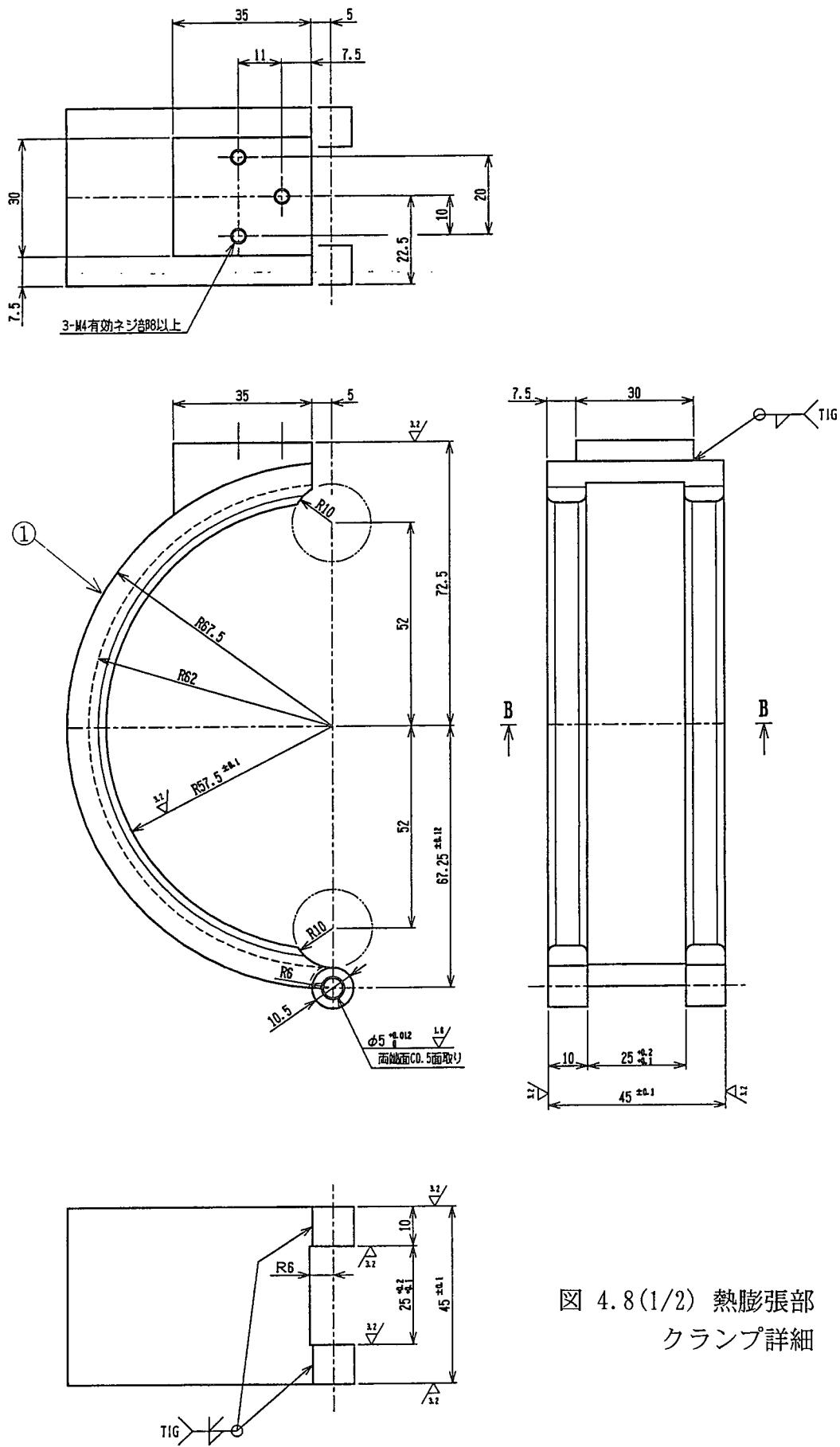
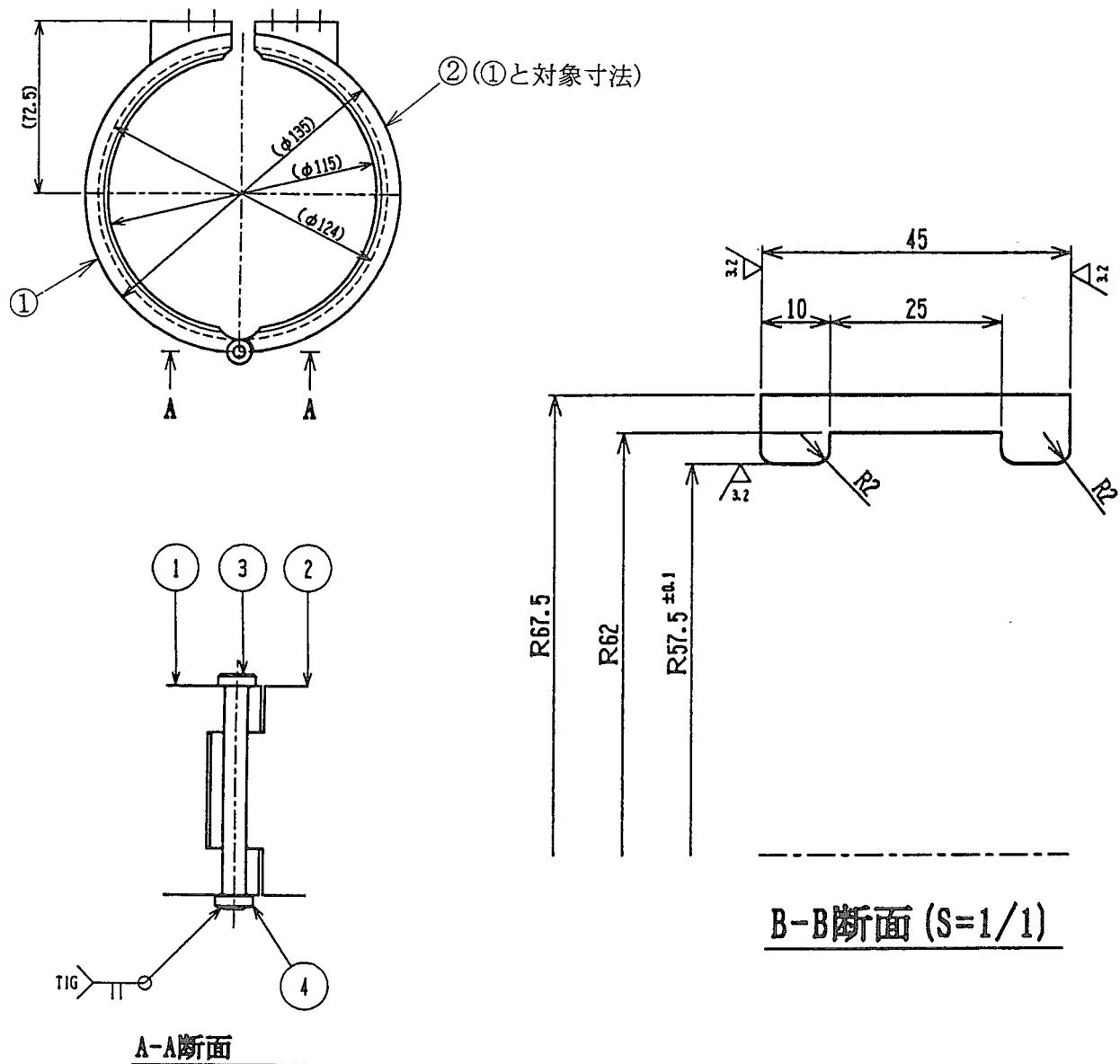


図 4.7(4/4) 一般部クランプ詳細—ファスナー





③、④は一般部用と同様

図 4.8 (2/2) 热膨張部クランプ詳細

図4.1 番号	名 称	材 質	B (mm)
⑩	ガラス棒⑩	ガラス	191
⑪	ガラス棒⑪	“	188
⑫	ガラス棒⑫	“	191

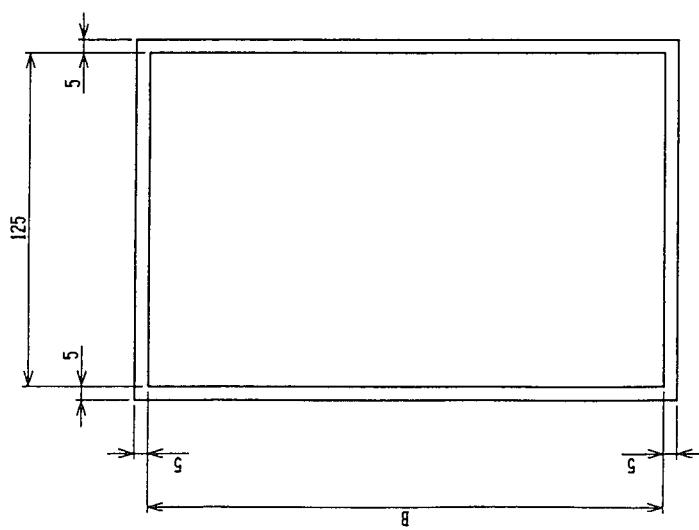


図 4.9 一般部等ガスケット詳細

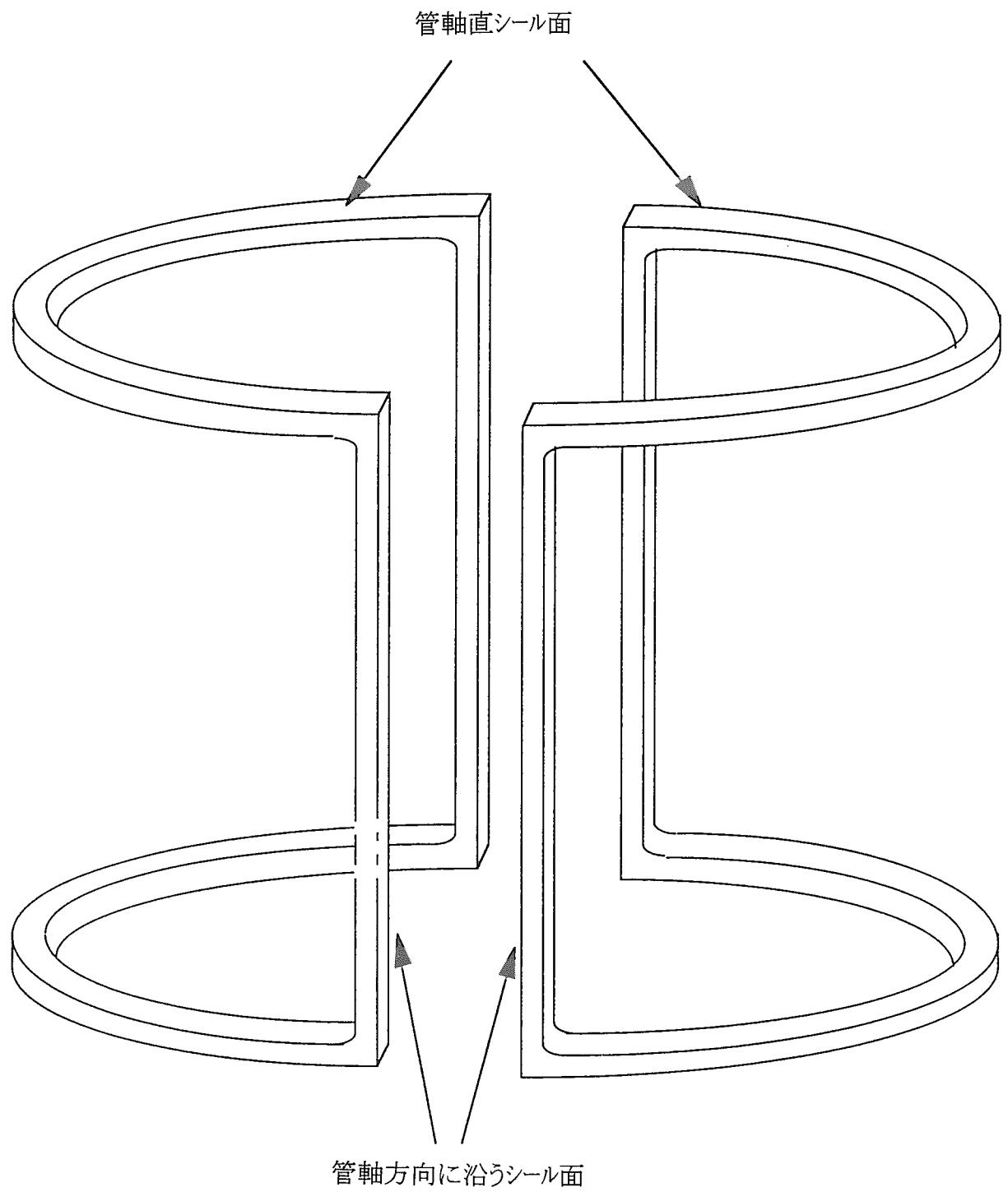
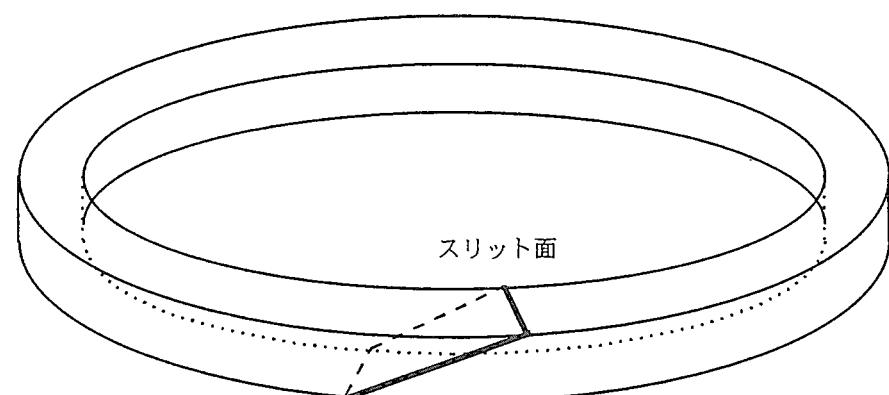
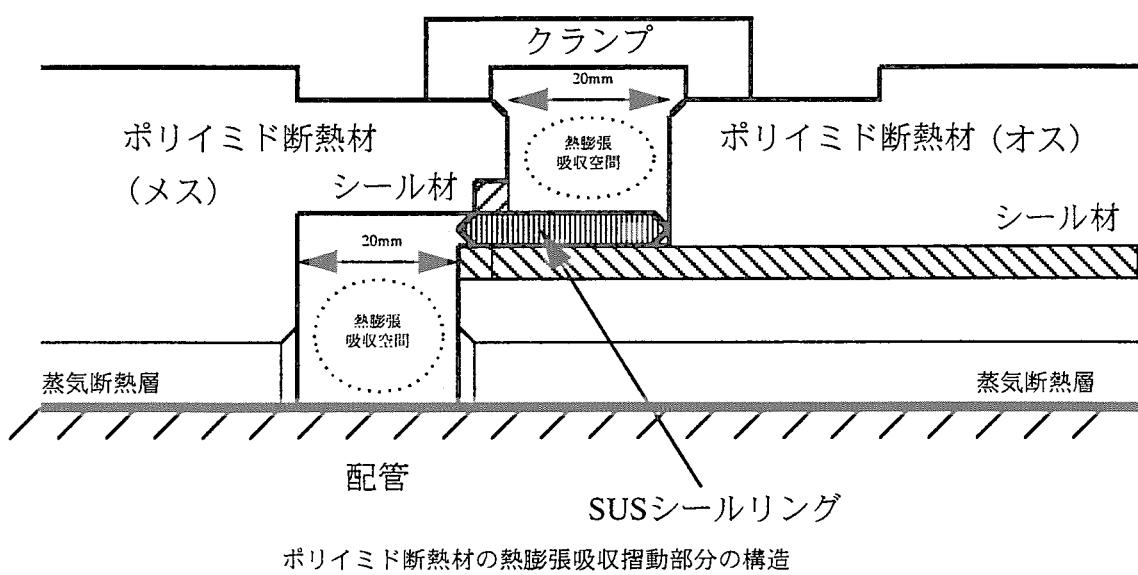
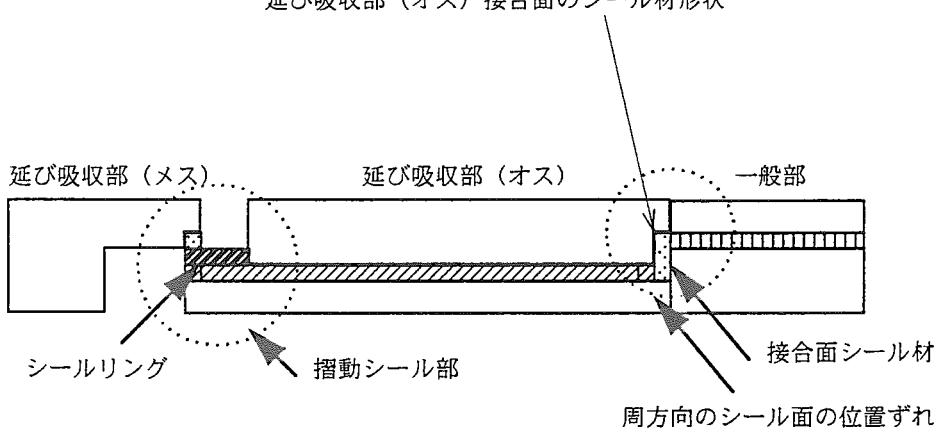


図 4.10 一般部ガスケットシール面構成図



延び吸収部(オス)接合面のシール材形状



延び吸収部(オス)と一般部のシール方法

図 4.11 ポリイミド断熱材の熱膨張吸収部のシール構造

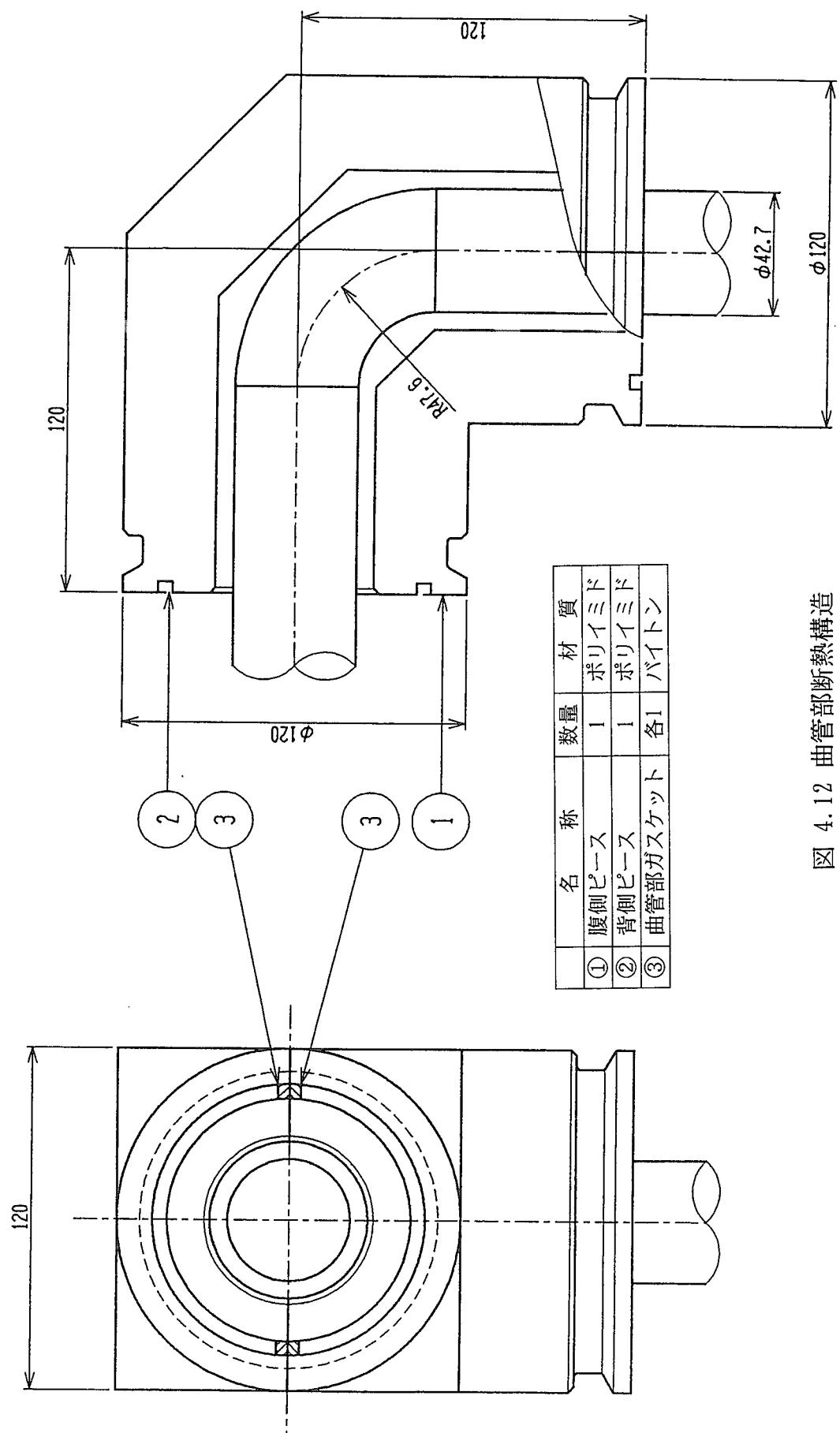


図 4.12 曲管部断熱構造

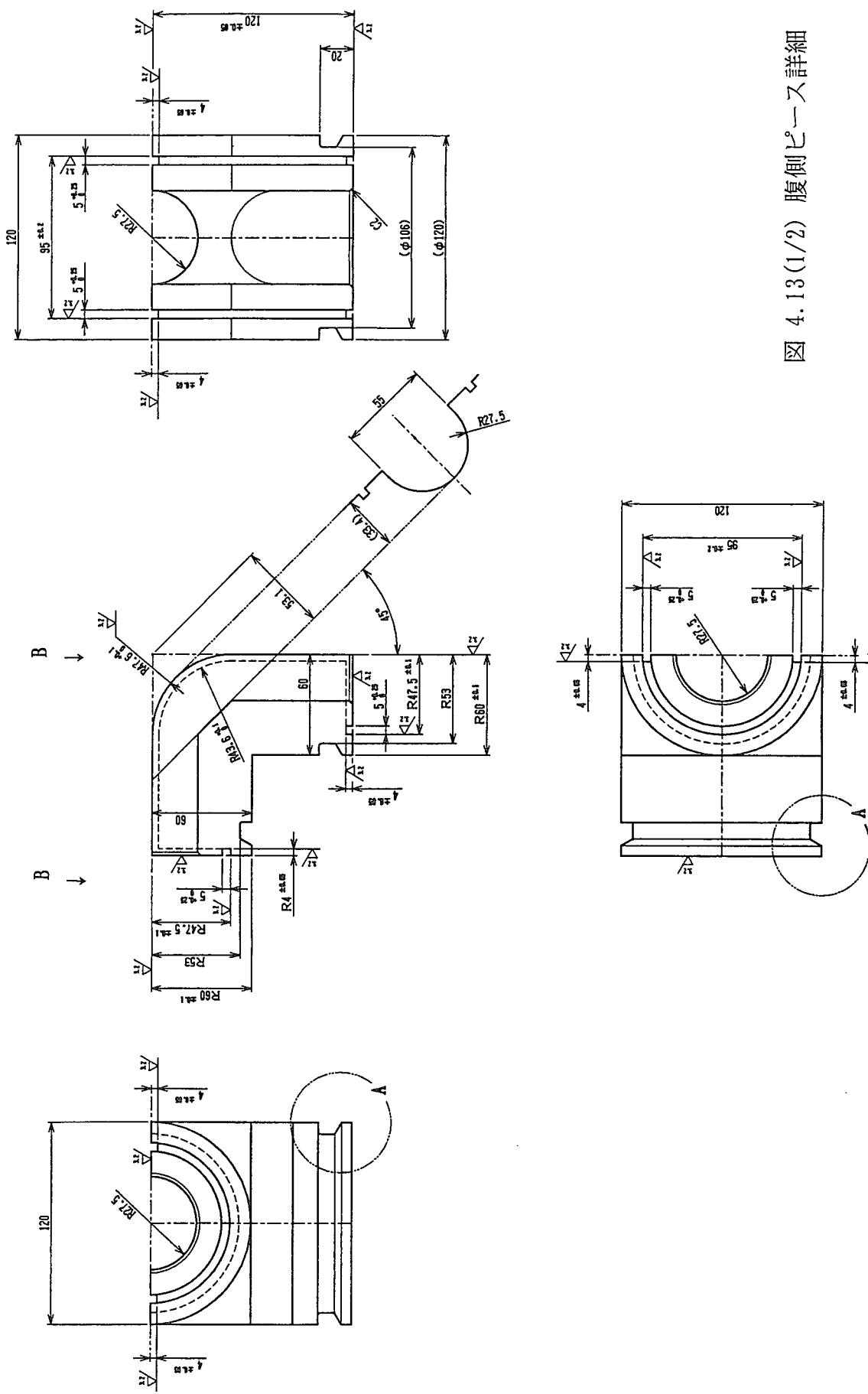


図 4.13(1/2) 腹側ピース詳細

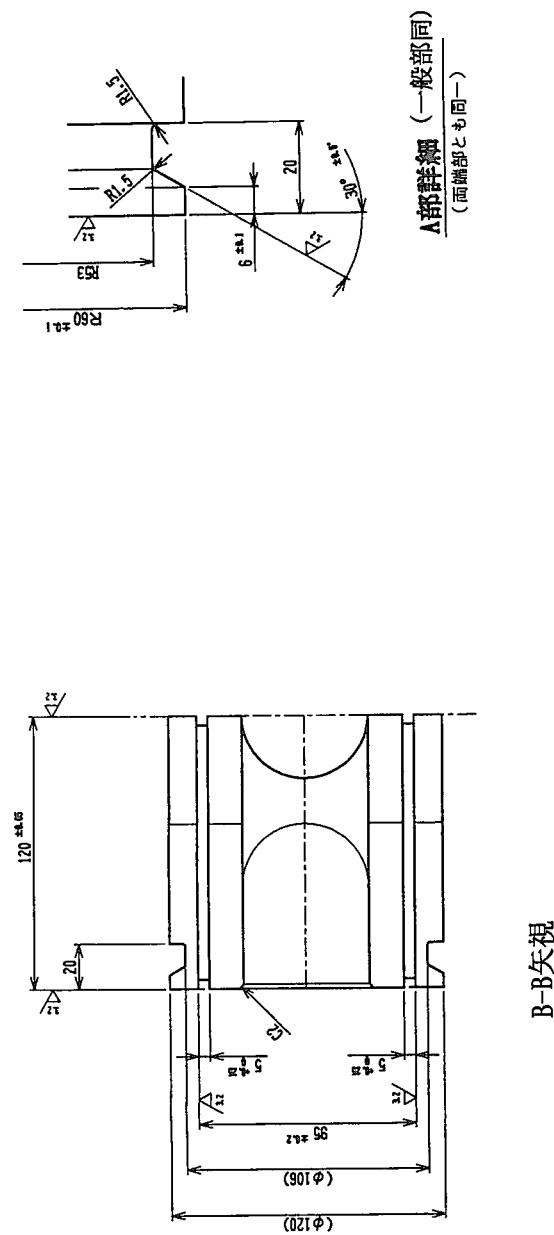


図 4.13 (2/2) 腹側ピース詳細

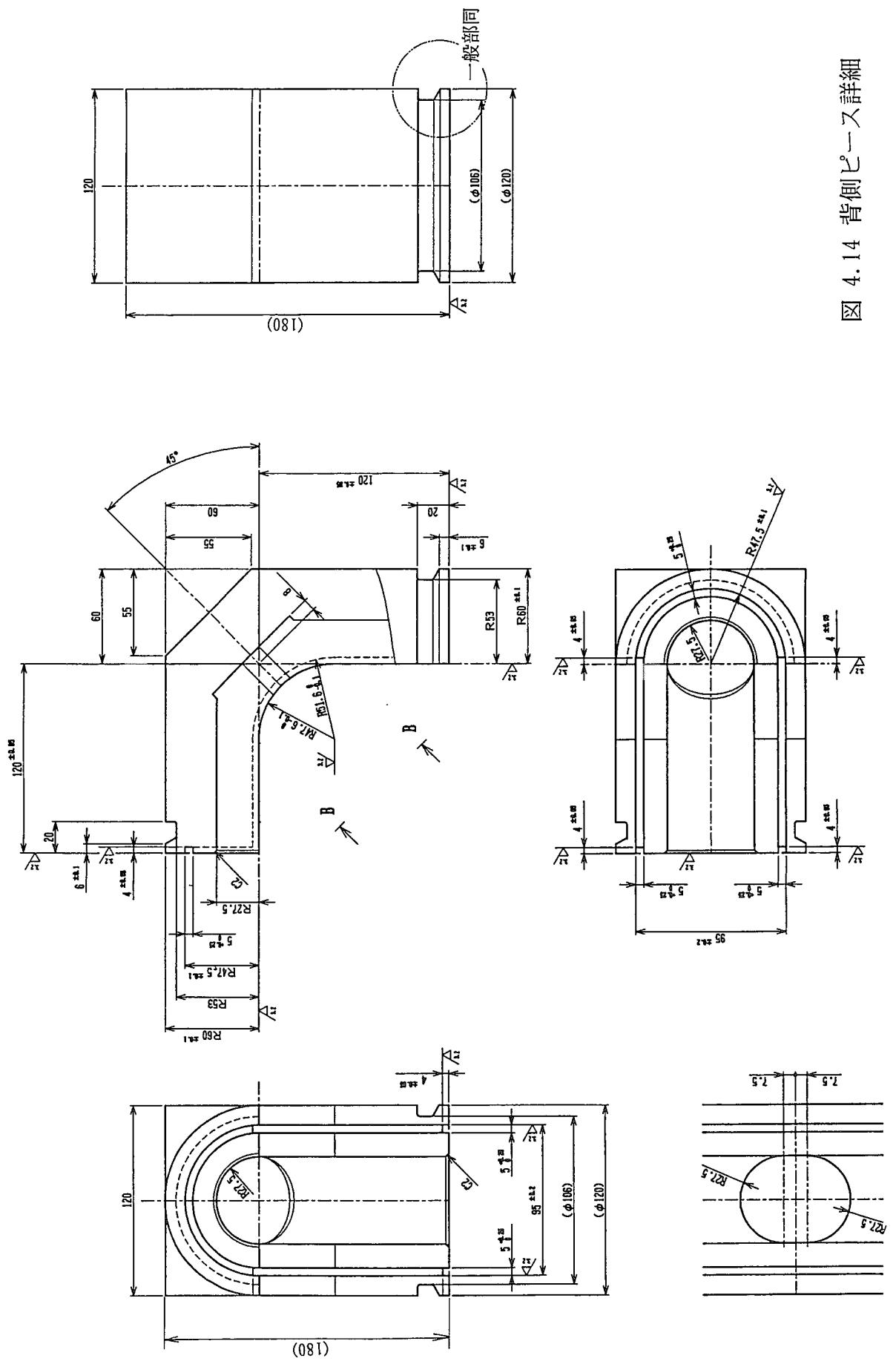


図 4.14 背側ビース詳細

B-B 矢板

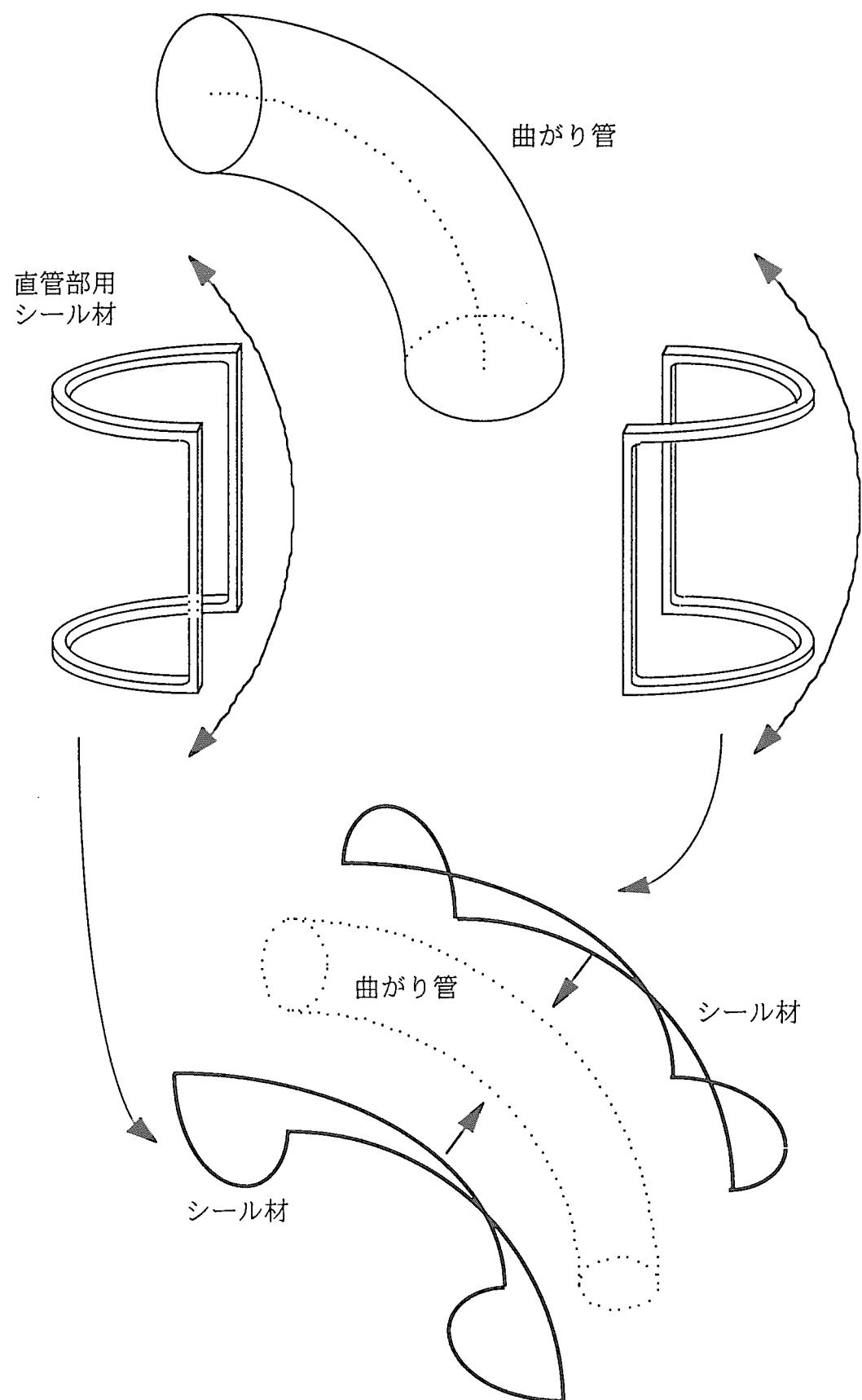


図 4.15 曲管部 ガスケット構成図

符号	名 称	数 量	材 質
①	主管部ピース	1対(2)	ポリイミド
②	枝管部ピース	1対(2)	ポリイミド
③	主管部ガスケット	2	バイトン
④	枝管部ガスケット	2	バイトン

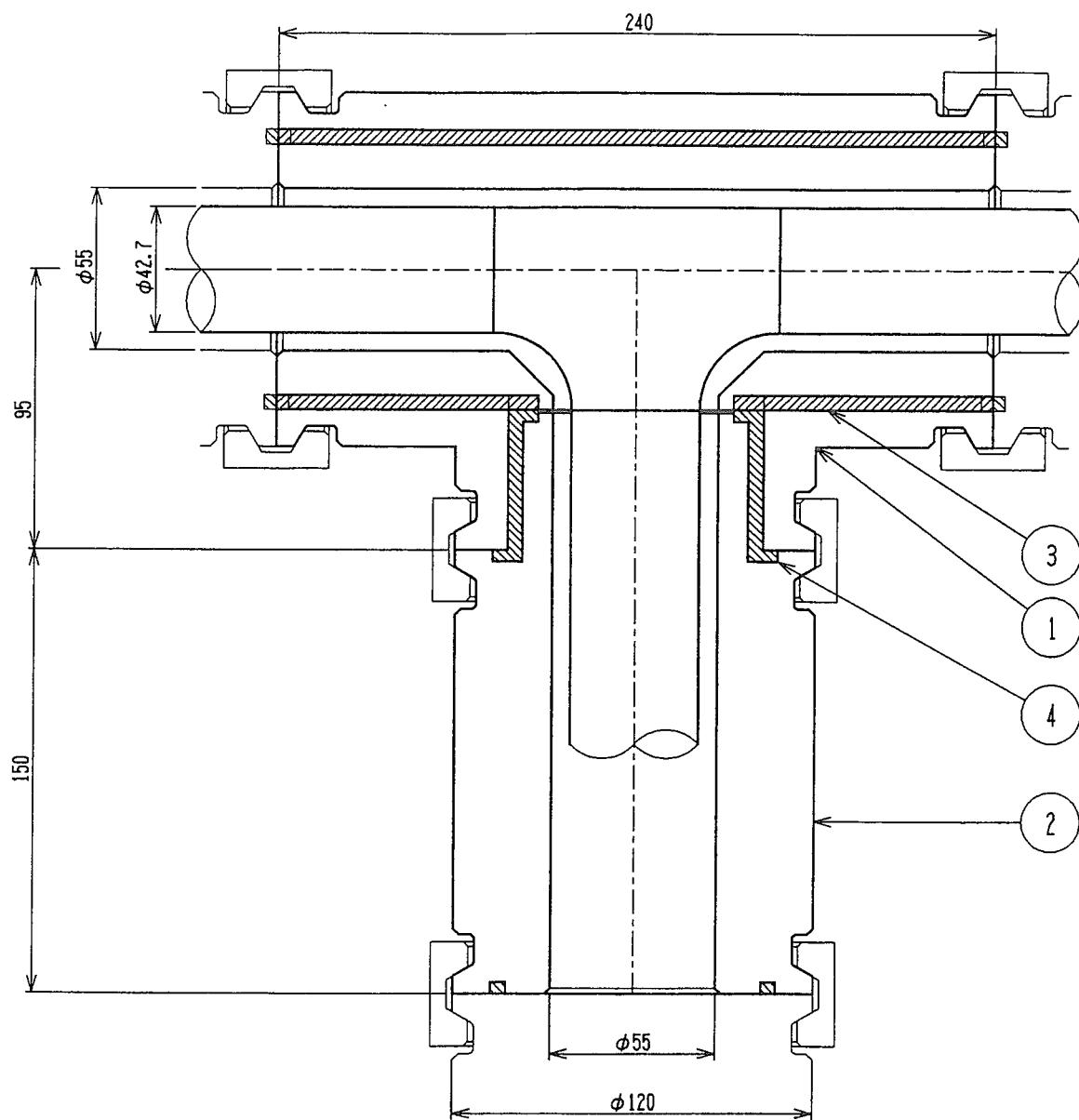


図 4.16 分岐部構造全体図

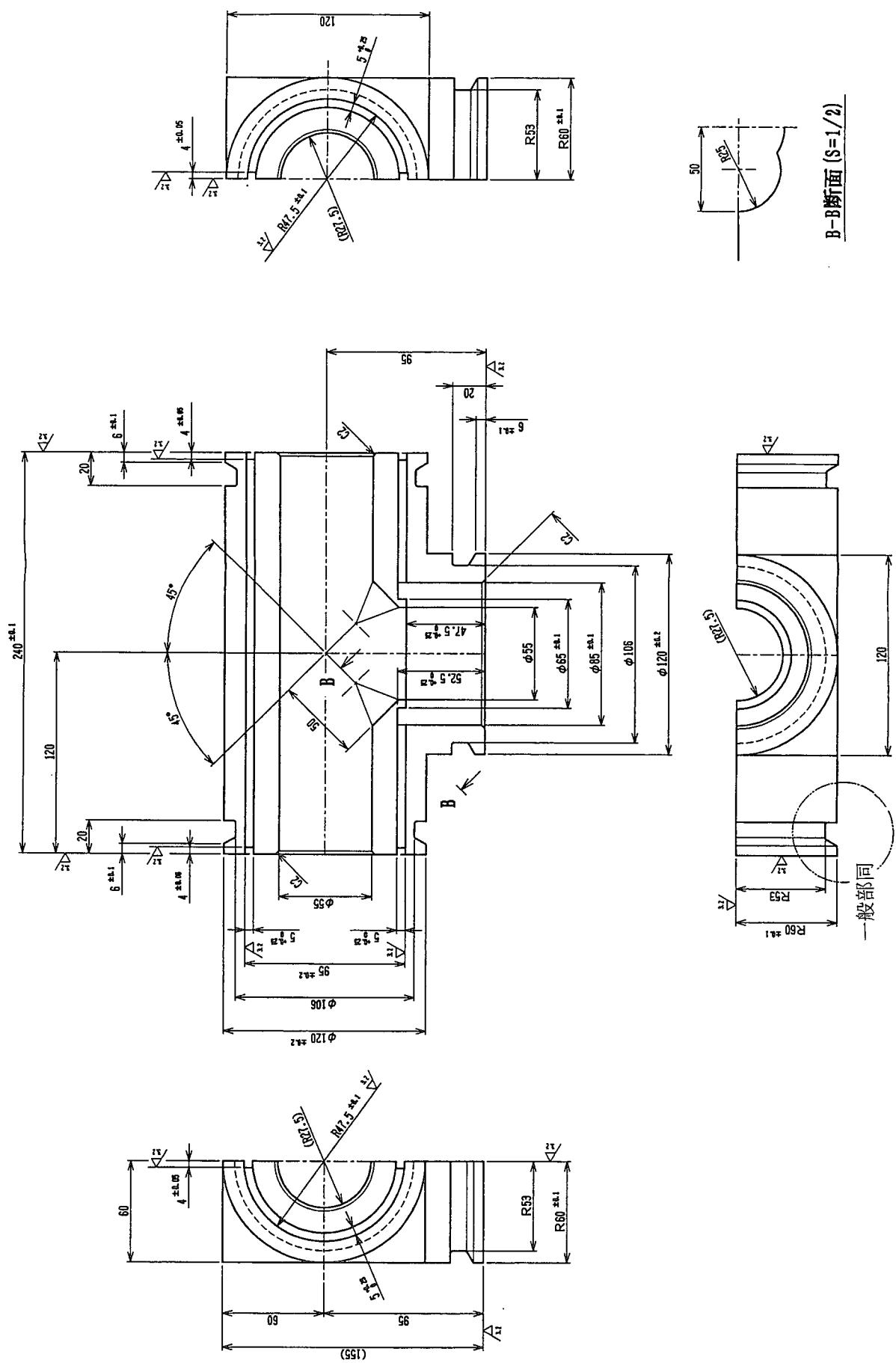


図 4.17 主管部詳細

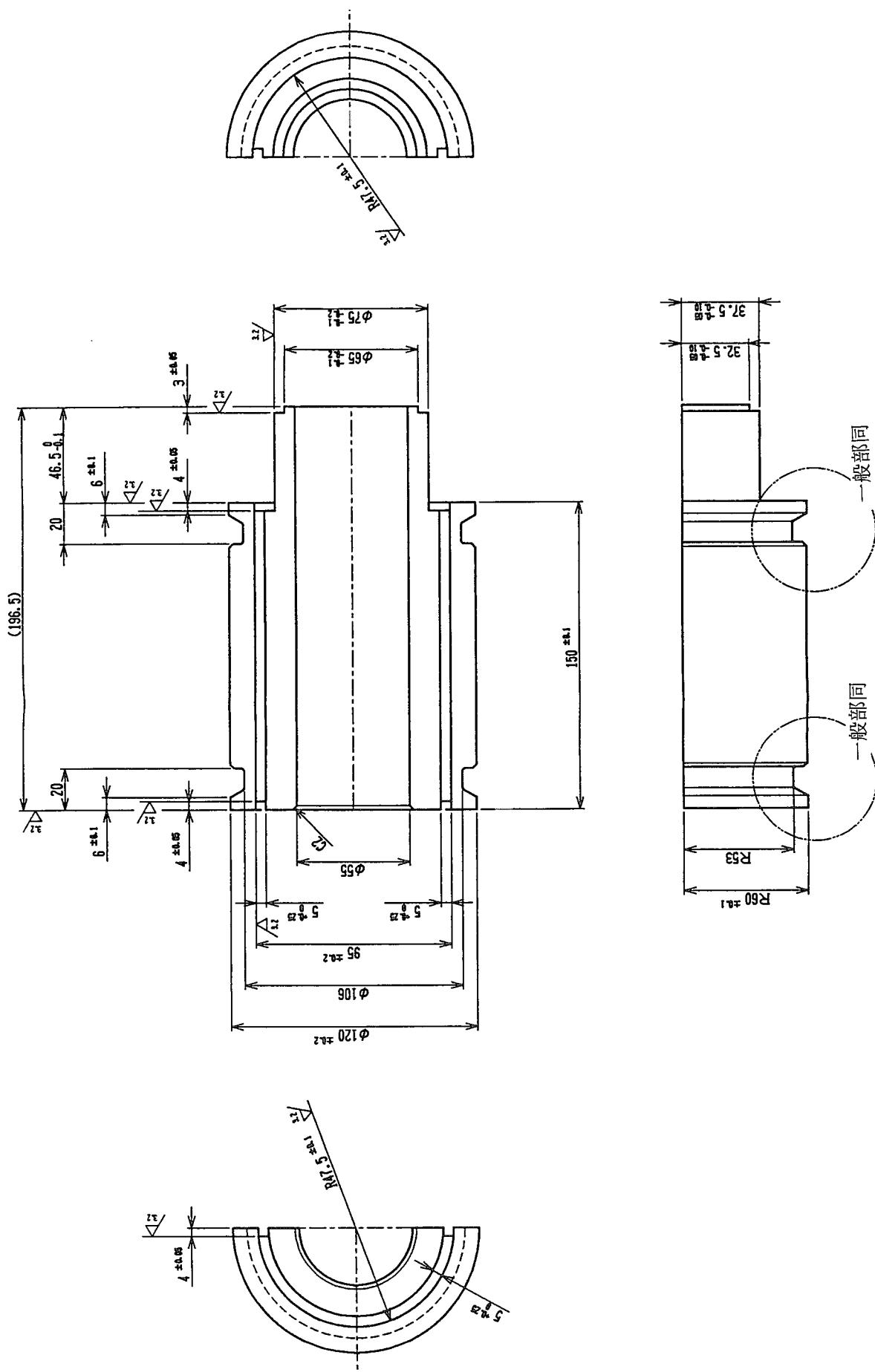


図 4.18 枝管部詳細

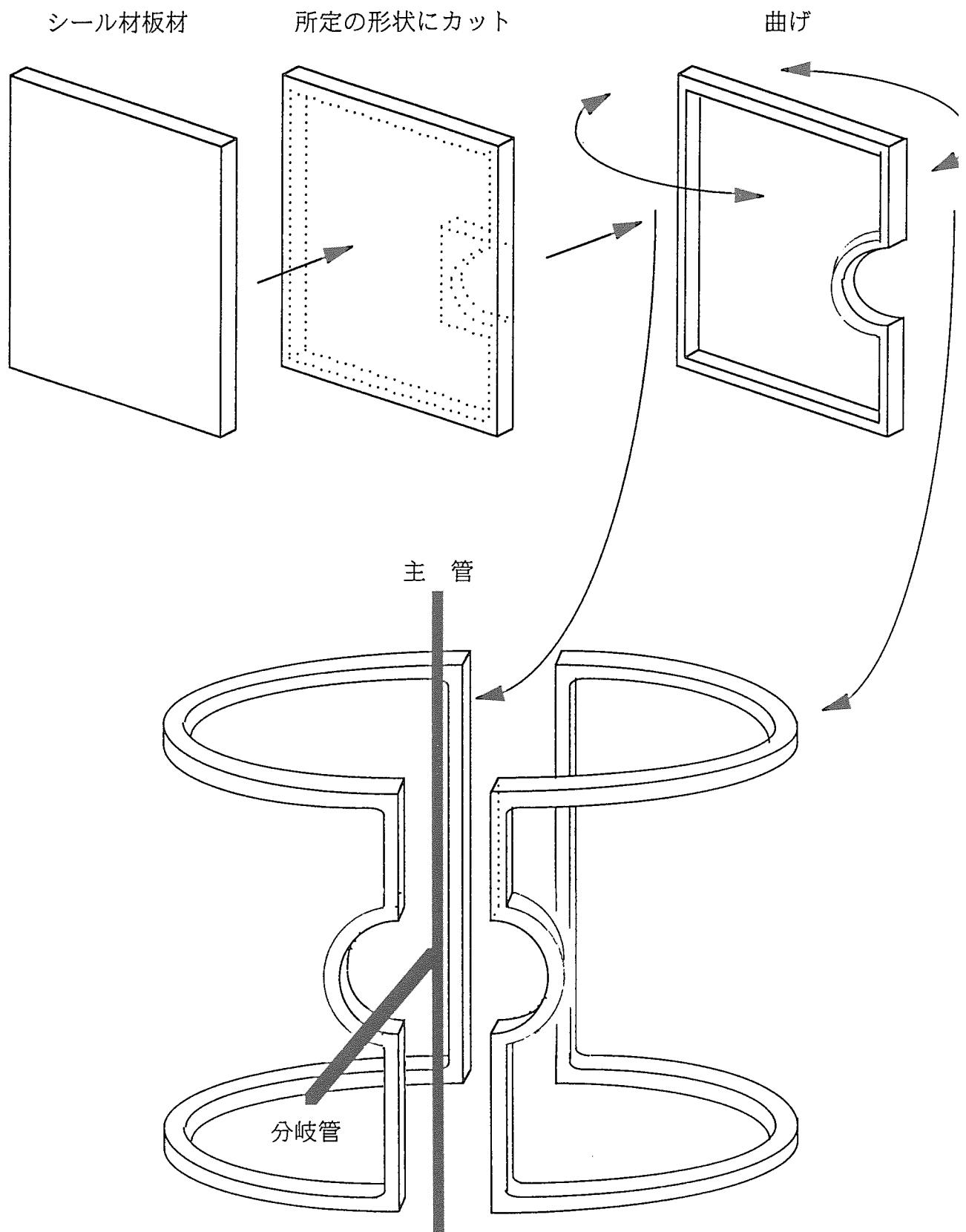


図 4.19 主管部ガスケット構成図

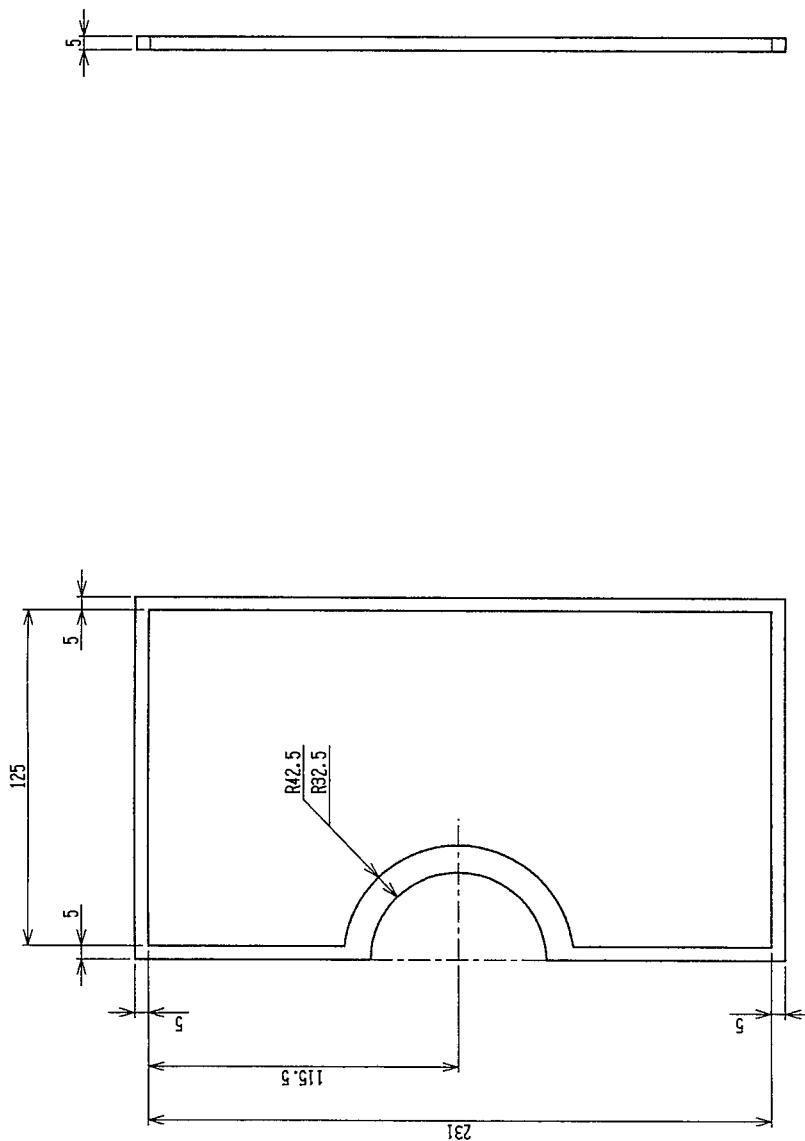


図 4.20 主管部ガスケットト詳細

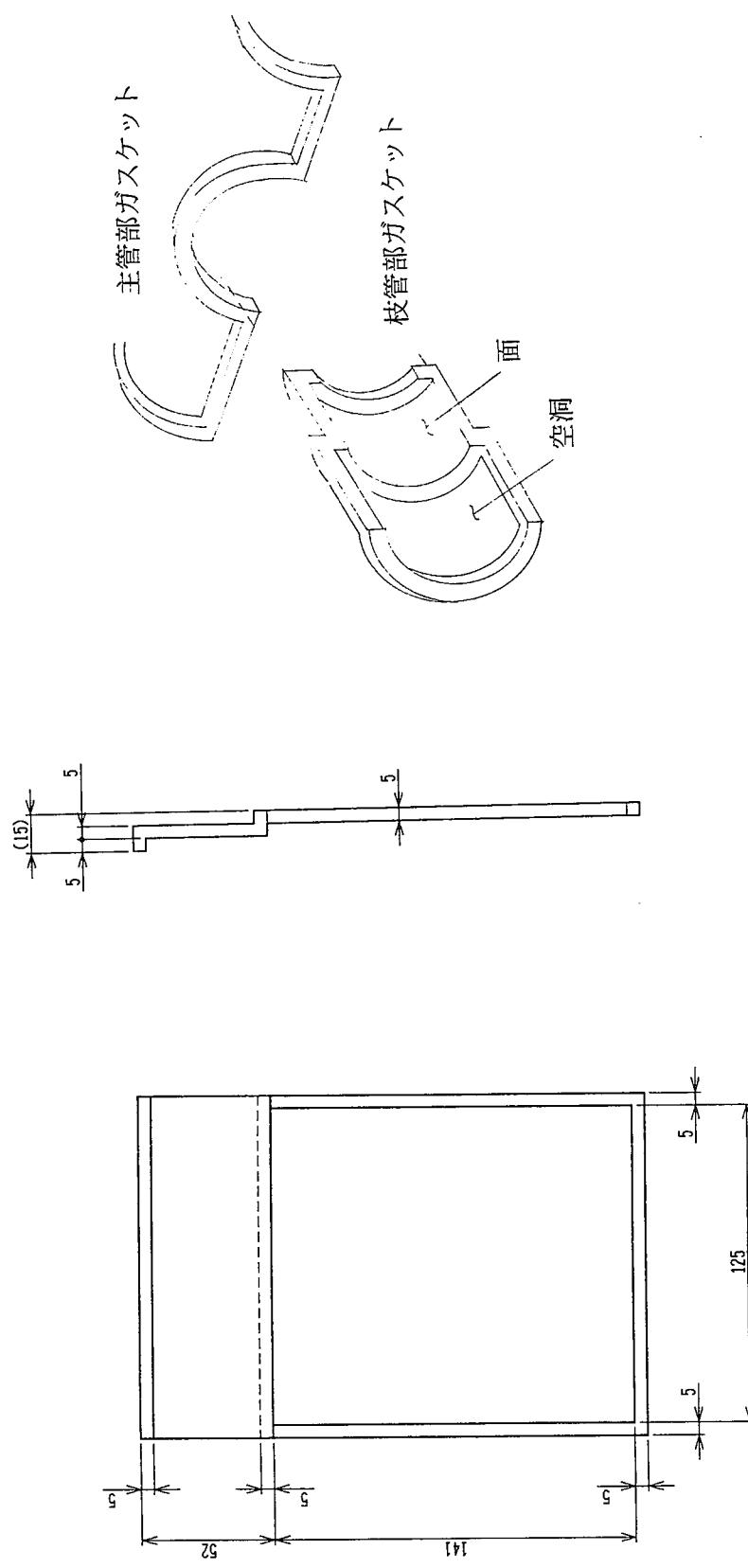
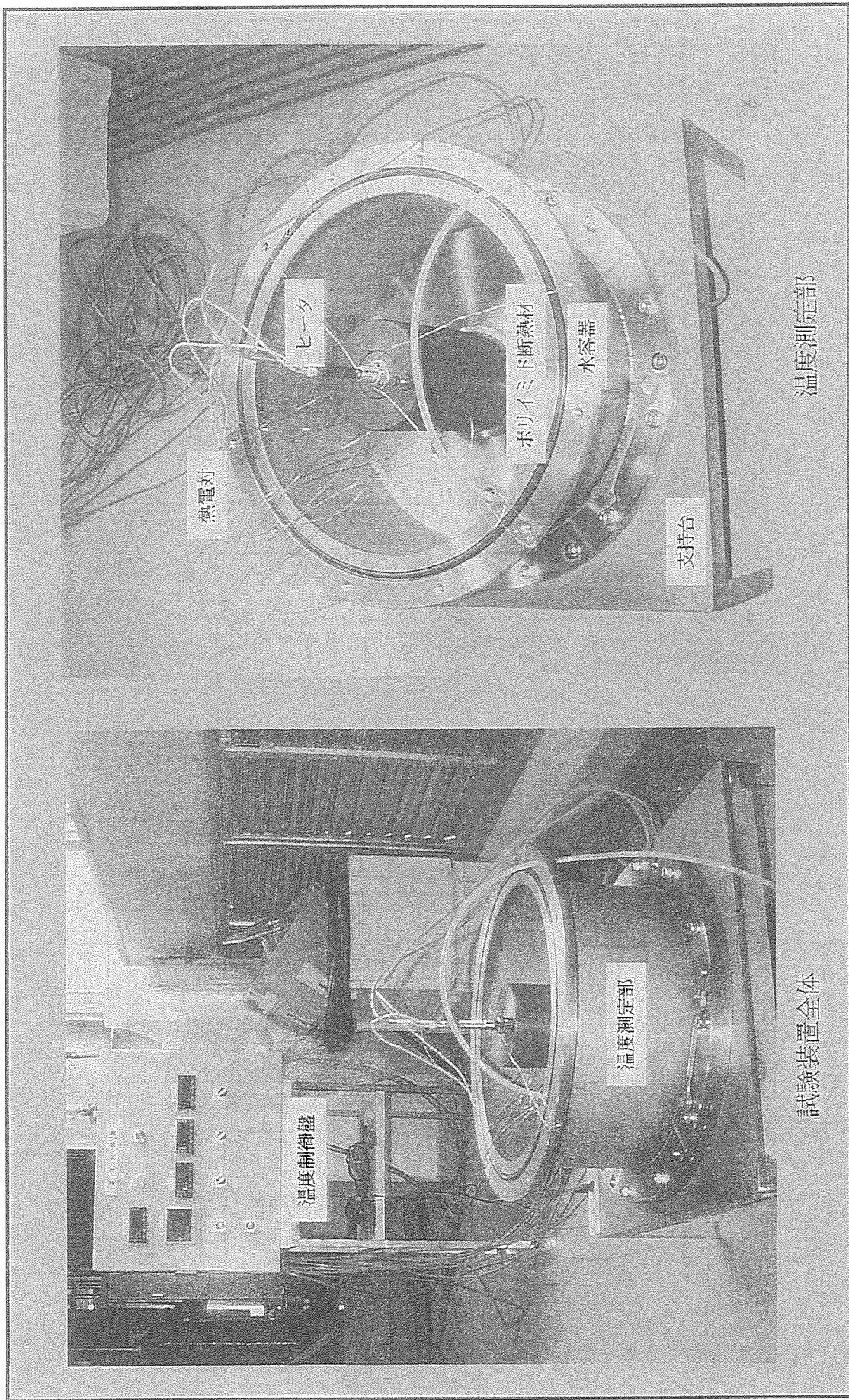


図 4.21 枝管部ガスケット詳細



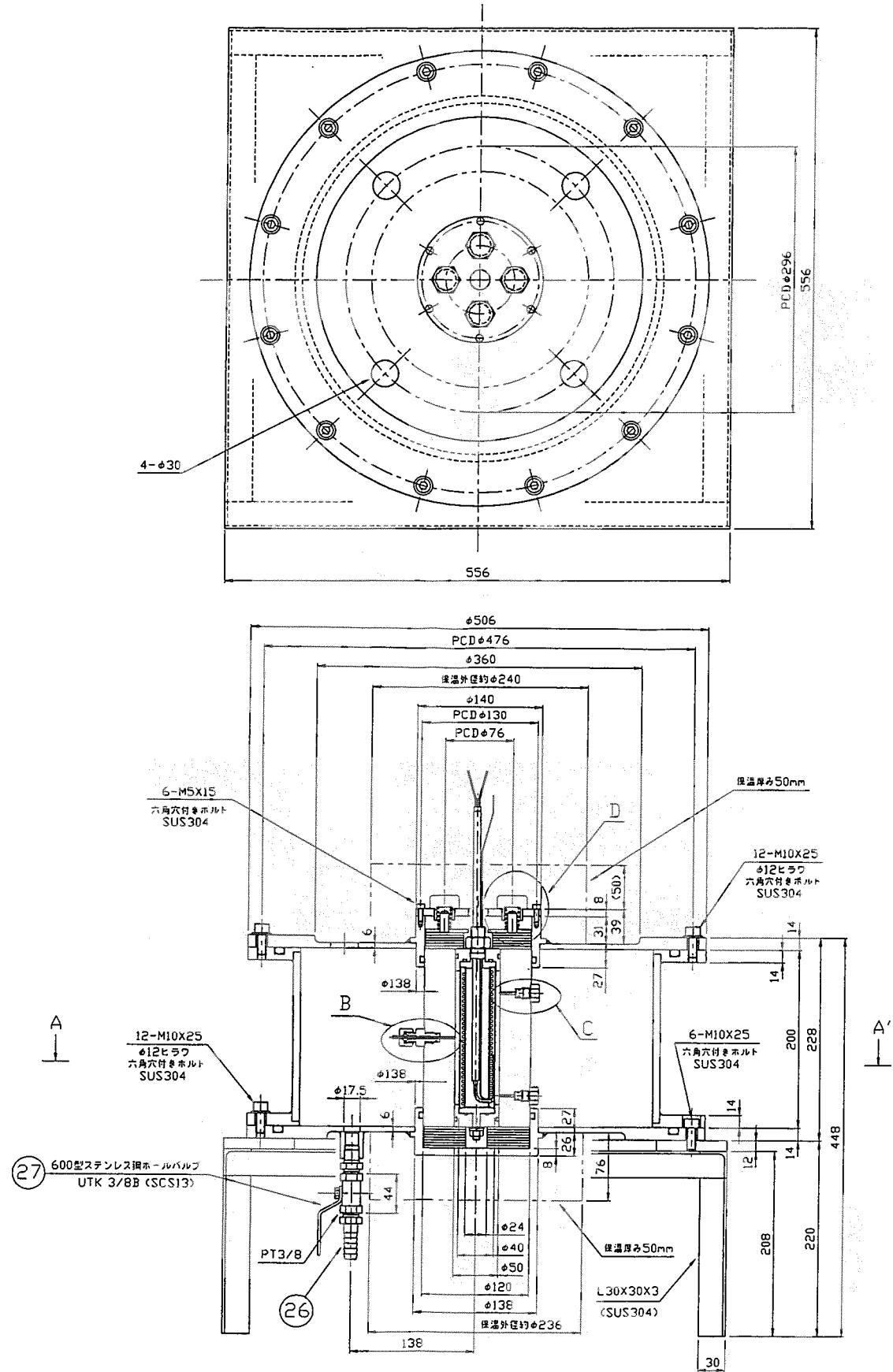


図 5.1-1 実験装置全体図

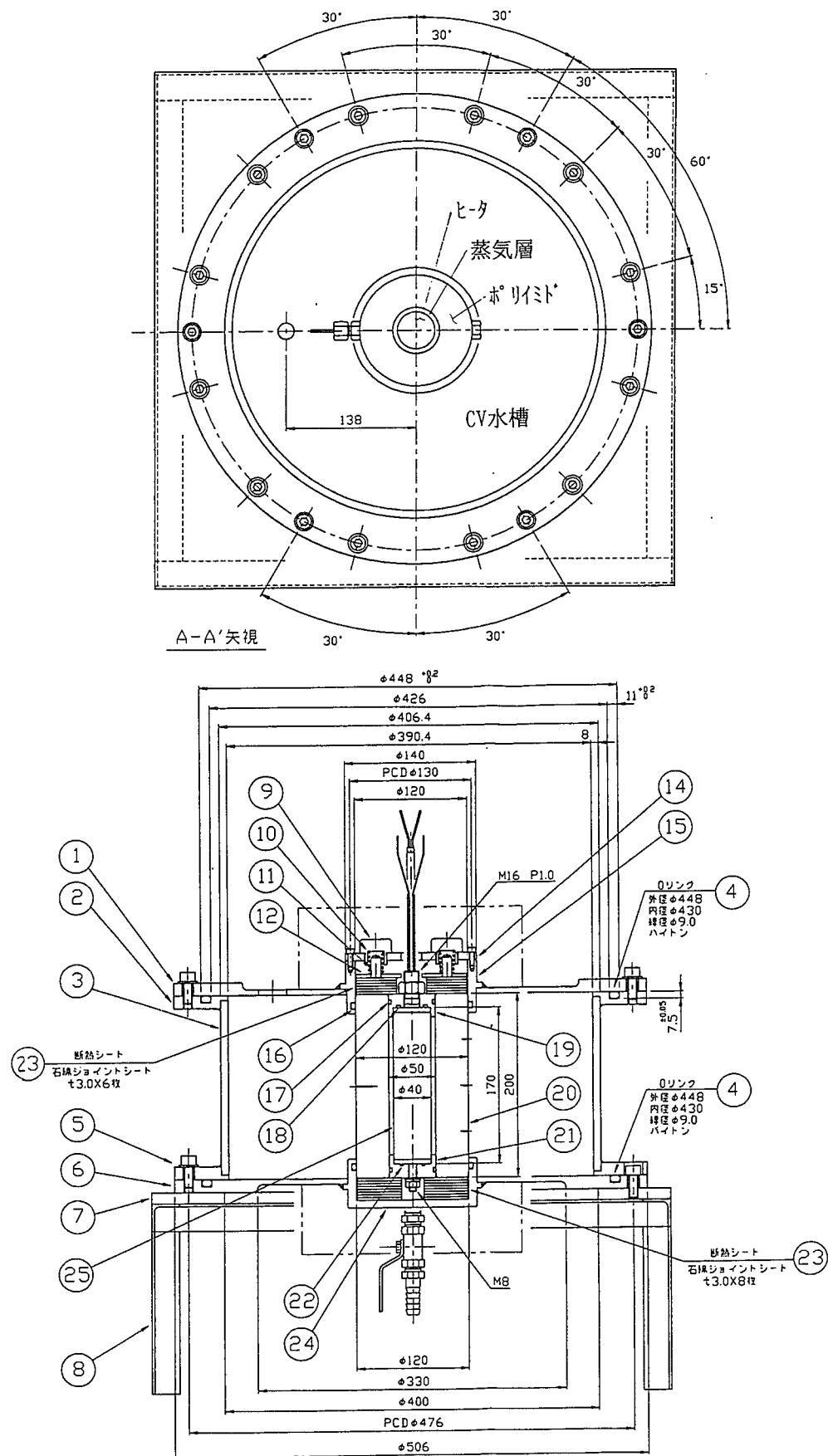
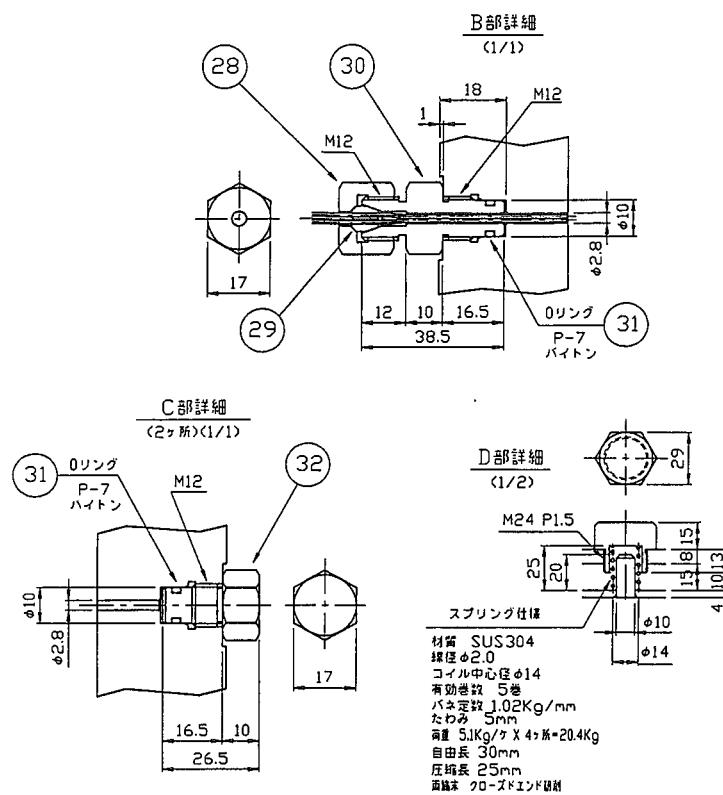


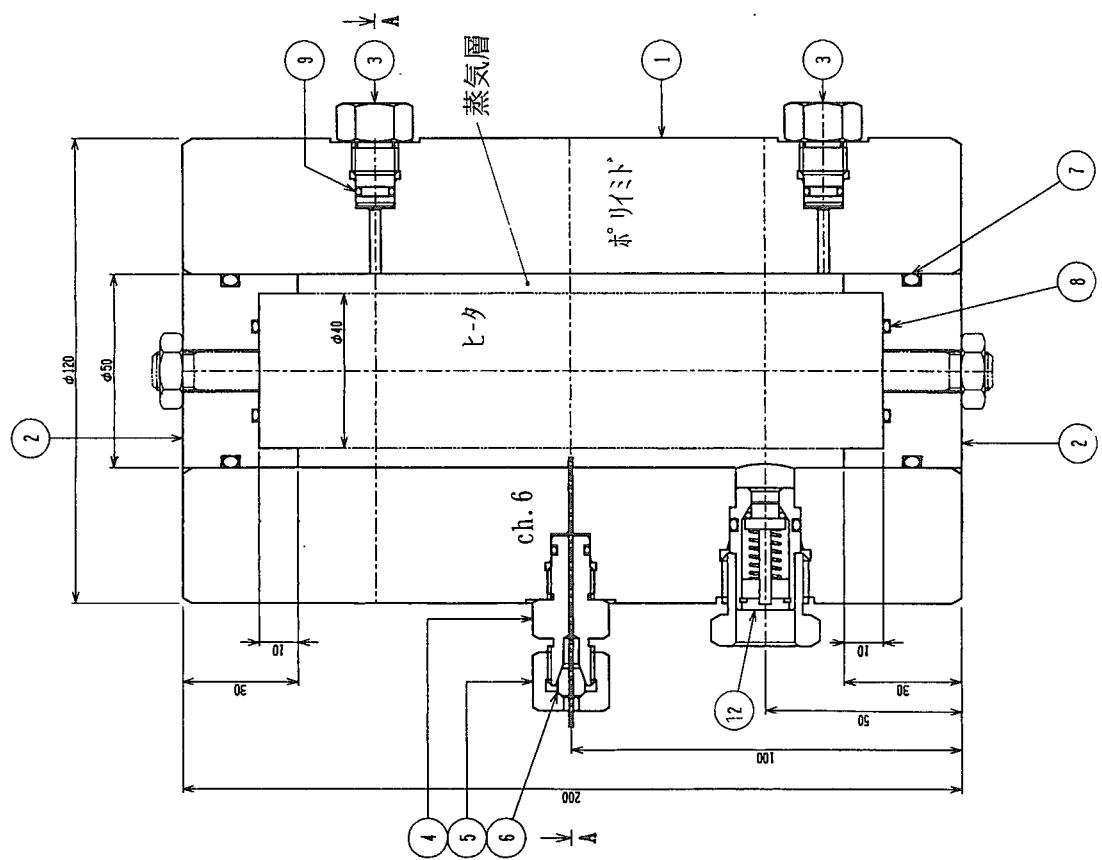
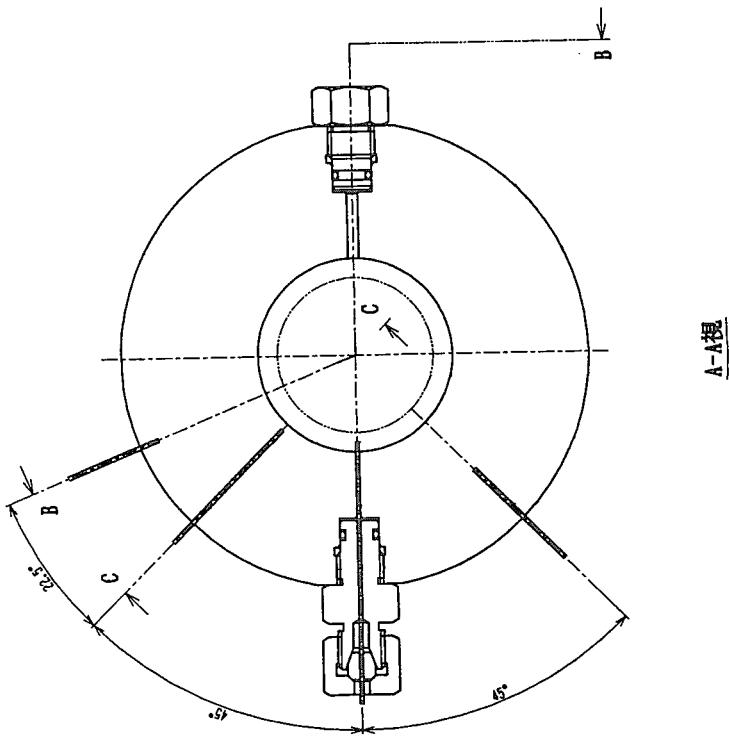
図 5.1-2 実験装置全体図



品番	部品名	員数	材質	素材寸法
32	プラグ	2	ポリイミド	
31	Oリング	3	バイトン	P-7
30	T/C用締手	1	ポリイミド	
29	シール材	1	バイトン	図番KA84221-4007
28	フクロナット	1	ポリイミド	図番KA84221-4006
27	ボールバルブ	1	SCS13	UTK 3/8B 銅製タイプ キップ
26	ホースノズル	1	BC	PT3/8
25	ヒーター部組	1		
24	下部ガイド	1	SUS304	
23	断熱シート(2)	8	破綻シート	t3.0
22	Oリング	1	バイトン	P-20
21	断熱材-B(蓋下部)	1	ポリイミド	図番TG-30821
20	断熱材(胴部)	1	ポリイミド	図番KA84221-1002
19	断熱材-A(蓋上部)	1	ポリイミド	図番TG-30820
18	Oリング	1	バイトン	P-24
17	Oリング	2	バイトン	P-44
16	Oリング	2	バイトン	P-120
15	上部ガイド	1	SUS304	
14	押さえ蓋	1	SUS304	
13	断熱シート(1)	6	破綻シート	t3.0
12	押さえプレート	1	SUS304	
11	スプリングガイド	4	SUS304	
10	スプリング	4	SUS304	
9	押しネジ	4	SUS304	
8	架台	1	SUS304	
7	ベース	1	SUS304	
6	ソコイタ	1	SUS304	
5	下部フランジ	1	SUS304	
4	Oリング	2	バイトン	規格448, 規格430, 規格49
3	容器胴	1	SUS304	
2	上部フランジ	1	SUS304	
1	上部蓋	1	SUS304	

図 5.1-3 実験装置全体図

符 号	名 称	規 格	數 量	材 料
			No.	MATERIAL
1	断熱材(胴部)	Φ55×110±1.05	1	ポリミド材
2	断熱材(蓋部)		2	ポリミド材
3	プラグ		2	ポリミド材
4	T/C用把手		1	ポリミド材
5	袋ナット		1	ポリミド材
6	シール材		1	バイトン
7	Oリング		2	バイトン
8	Oリング		2	バイトン
9	Oリング		3	バイトン
12	弁		1	SUSS304



蒸氣層幅 2. 5/5

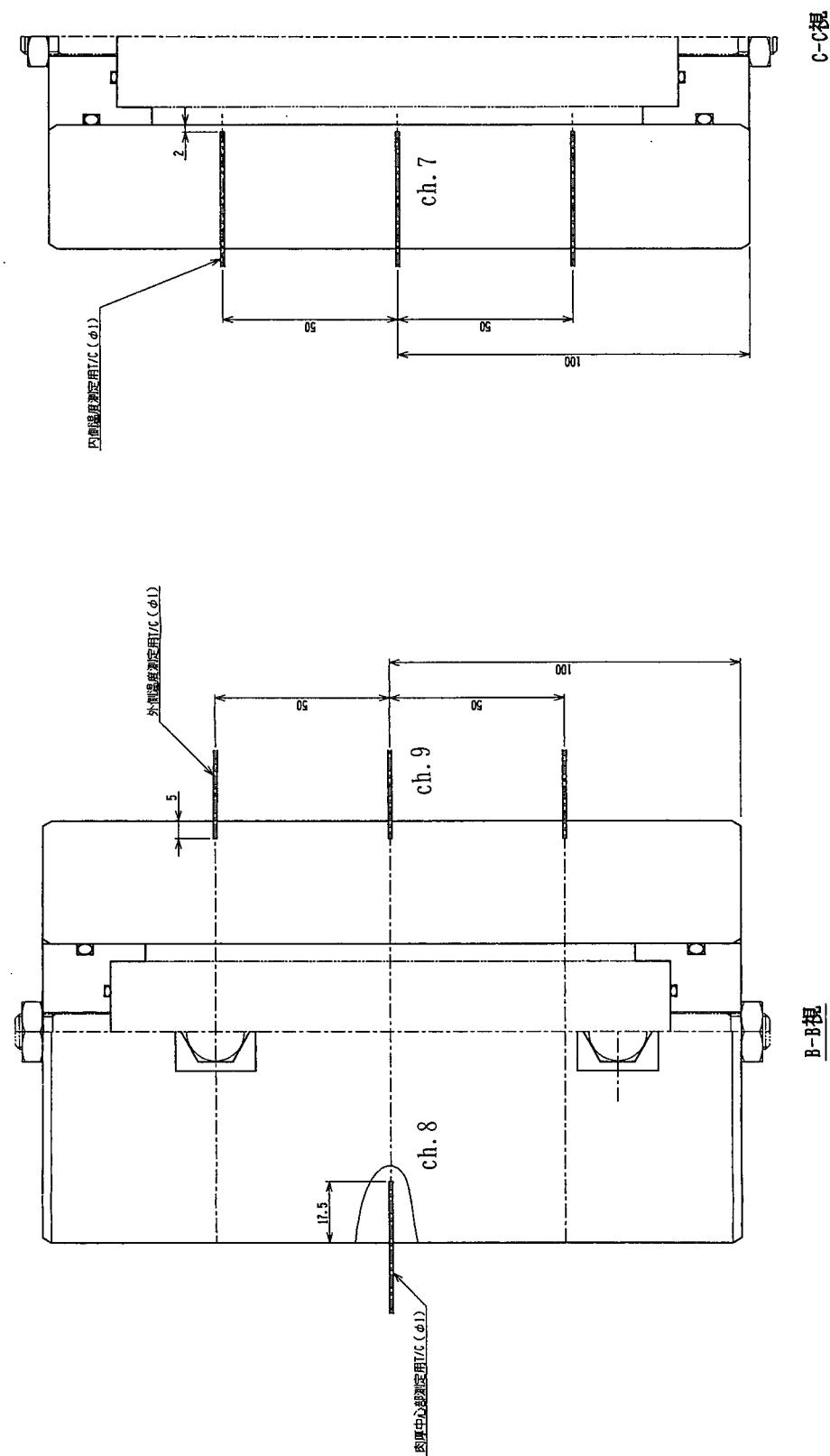


図 5.2-1 ポリイミド断熱材(2/2)
蒸気層幅 2.5/5

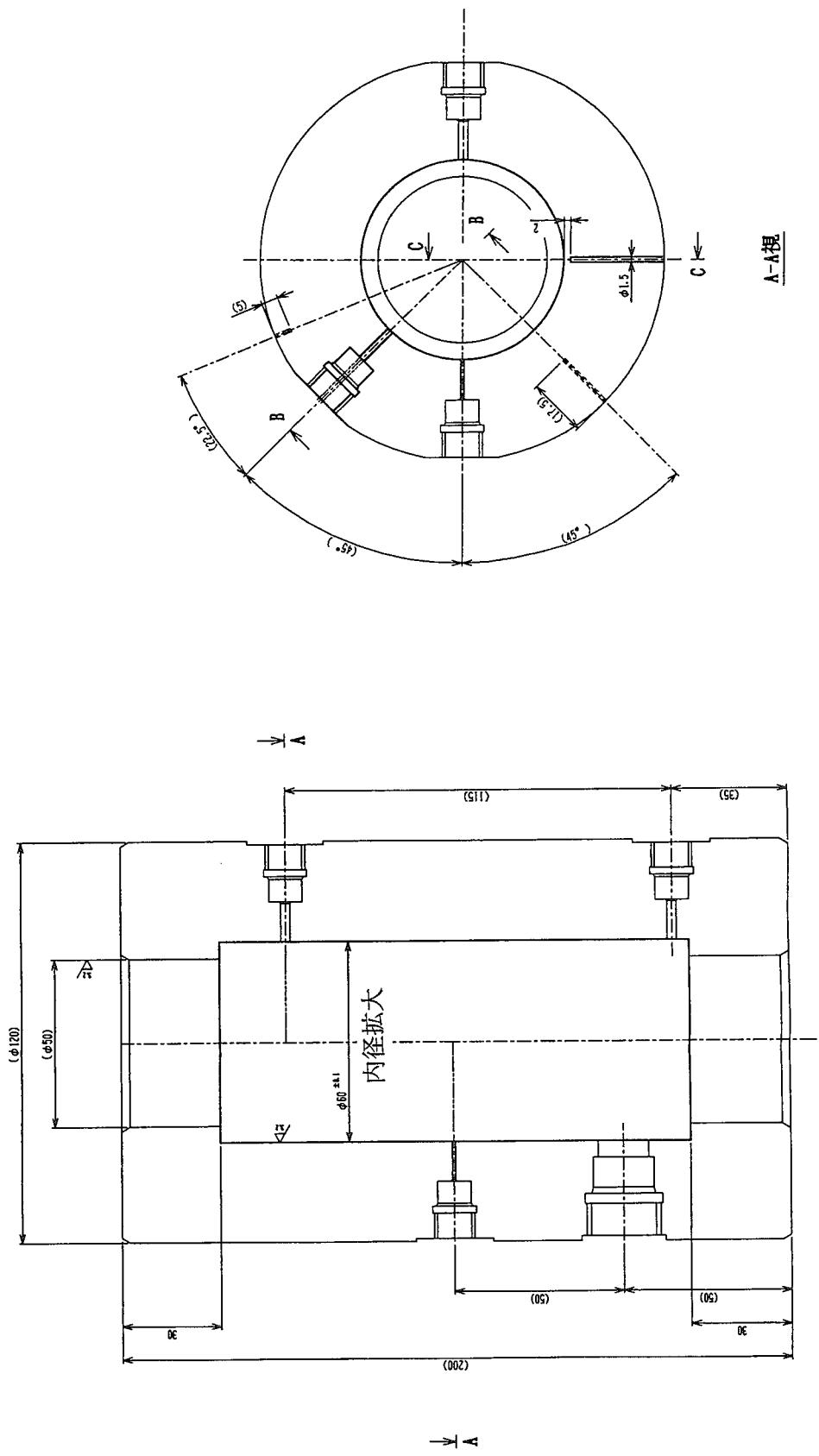


図 5.2-2 ポリイミド断熱材一内径拡大後(1/2)
蒸気層幅 10

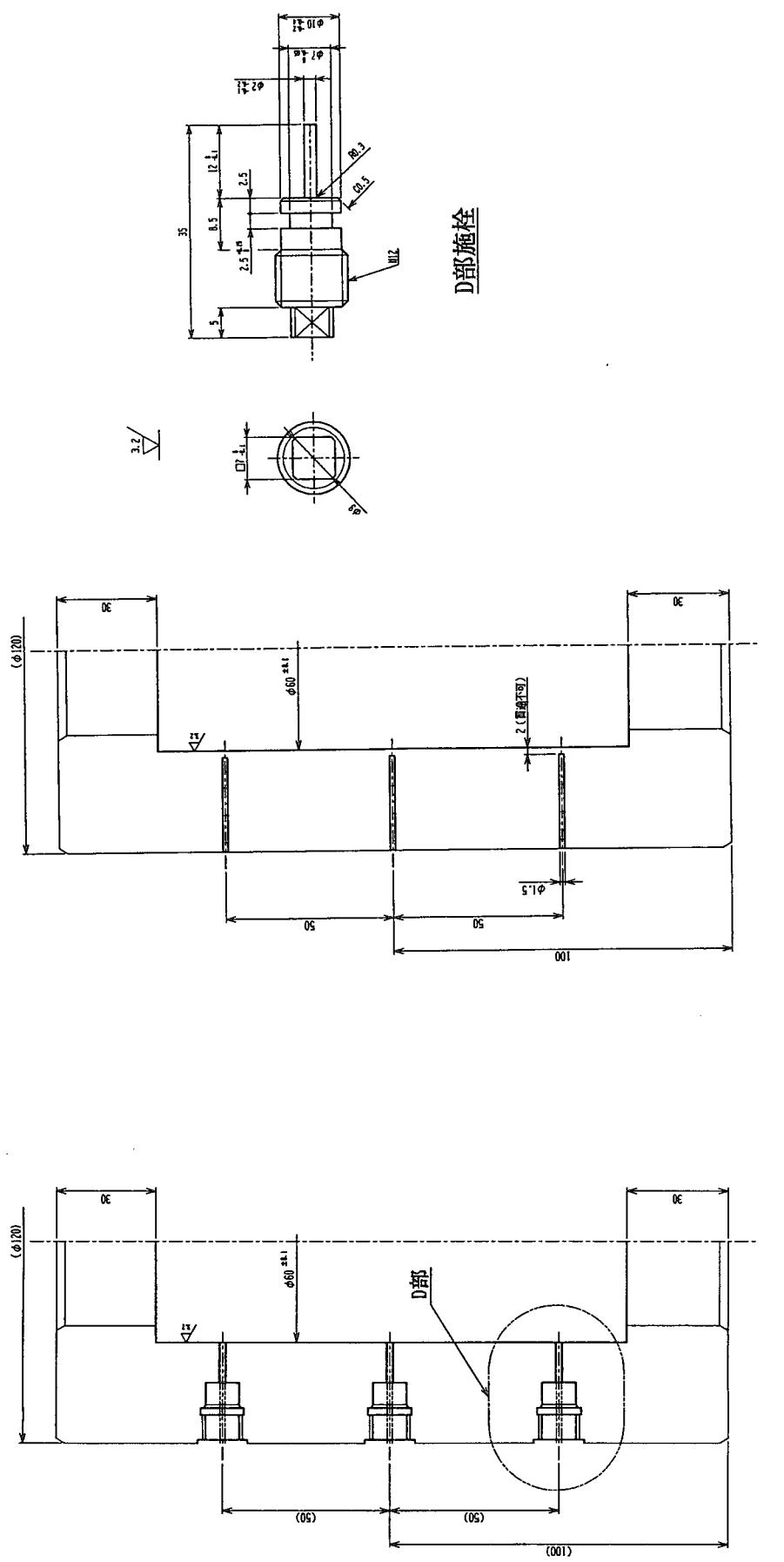
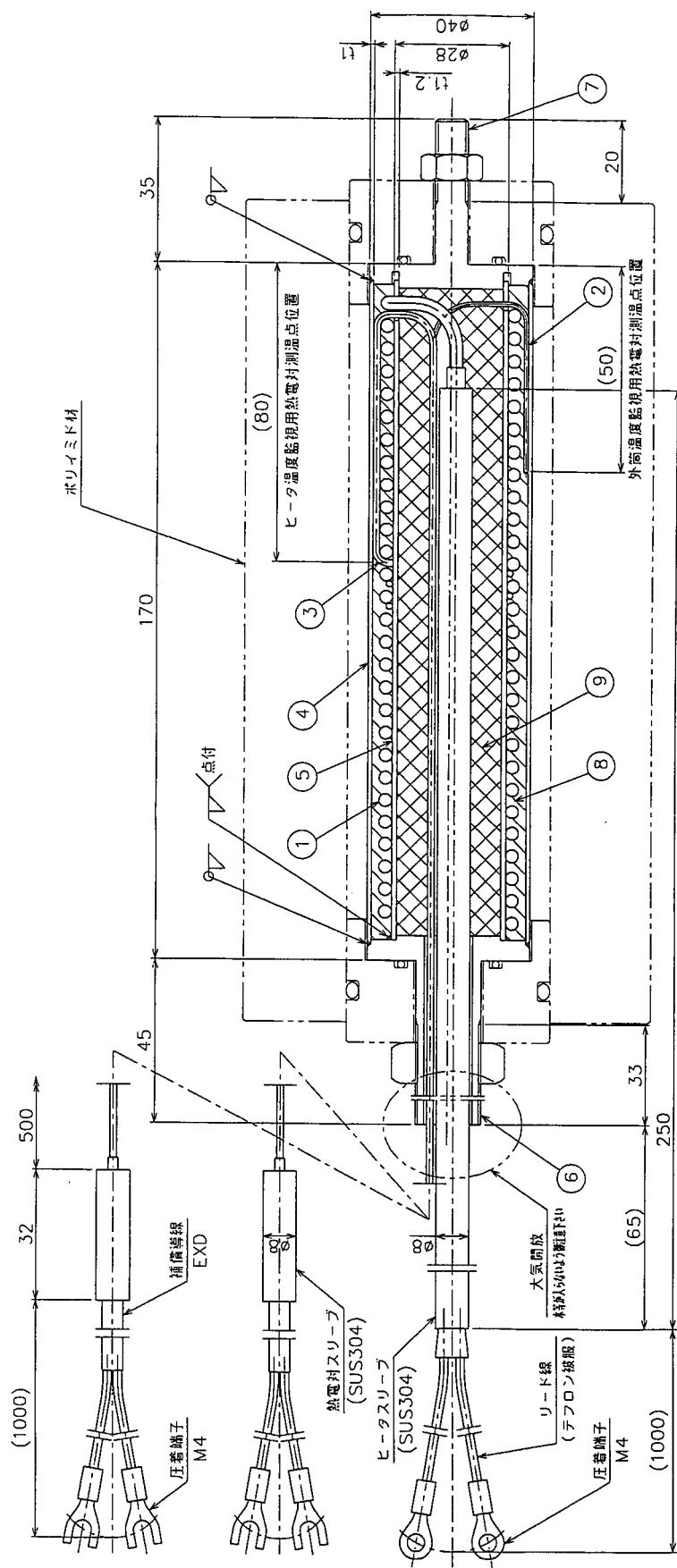


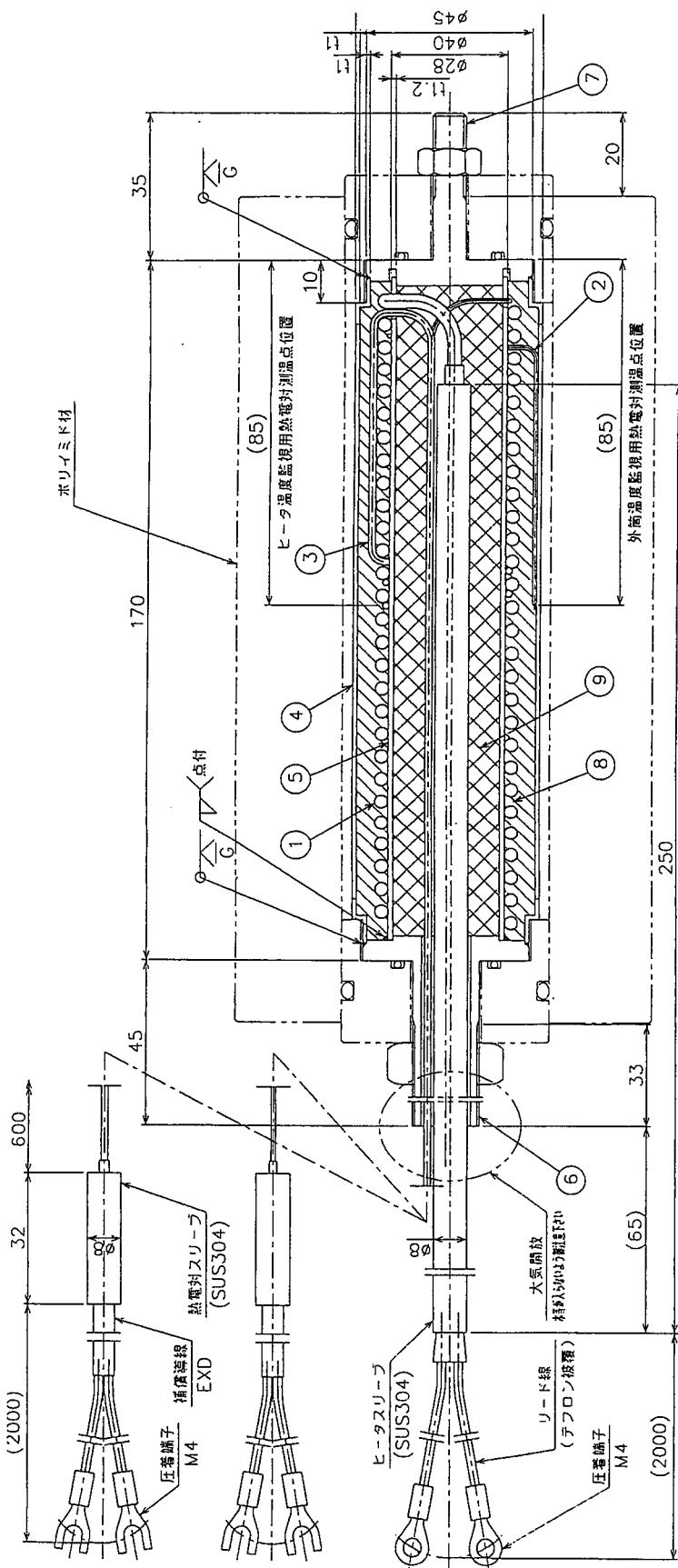
図 5.2-2 ポリイミド断熱材—内径拡大後(2/2)



符号	NO	名	姓	TITLE	材質	MIL.	個数	Q'TY	備考	REFERENCES
9	断熱材				ロックウル相当		1			
8	伝熱メント				—		1			
7	ボス日				SUS304		1		M8	
6	ボスA				SUS304		1		M16	
5	内 茄				SUS304		1		ø28x11.2	
4	外 茄				SUS304		1		ø40x11.0	
3	熱電対(ヒータ温度監視用)				NCF600		1		ø1.6	
2	熱電対(外筒温度監視用)				NCF600		1		ø1.0	
1	ヒーターシース				NCF600		1		ø3.2	

被加熱物	ポリミド樹
使用温度	260°C
常用圧力	大気圧
適用法規	-

5.3-1 ヒータ： $\phi 40$
(全體図部品25)



部品番号 NO	名 称	規 格	部品名	規 格	部品名	規 格
9	断熱材		ワカワ-断熱材	1		
8	伝熱セメント		—	1	M8	
7	ボス B		SUS304	1		
6	ボス A		SUS304	1	M16	
5	内 筒		SUS304	1	φ28×1.2	
4	外 筒		SUS304	1	φ45(φ40)×1.1	
3	熱電対(ヒータ温度監視用)		NCF600	1	φ1.6	
2	熱電対(外筒温度監視用)		NCF600	1	φ1.0	
1	ヒータシース		NCF600	1	φ3.2	

部品名	規 格	部品名	規 格
ヒータ温度監視用 熱電対仕様	ヒータ形	ヒータ温度監視用 熱電対仕様	ヒータ形
形式名称 T35形	形式名称 H35形	形式名称 T35形	形式名称 H35形
基準線長 K	基準線長 K	基準線長 K	基準線長 K
基準線径 φ0.17 mm	基準線径 φ0.27 mm	基準線径 φ0.17 mm	基準線径 φ0.380 mm
シース外径 φ1.0 mm	シース外径 φ1.6 mm	シース外径 φ1.0 mm	シース外径 φ1.6 mm
シース長 600 mm	シース長 600 mm	シース長 600 mm	シース長 600 mm
シース材質 NCF600	シース材質 NCF600	シース材質 NCF600	シース材質 NCF600
熱電対 #9 非鉛錫形	熱電対 #9 非鉛錫形	熱電対 #9 非鉛錫形	熱電対 #9 非鉛錫形
数量 1 本	数量 1 本	数量 1 本	数量 1 本

図 5.3-2 ヒータ : φ 45

(全体図部品25)

ITEM 符 号	名 称 DESCRIPTION	数 量 No.	材 料 MATERIAL	備 要 NOTE	
				備 要 NOTE	備 要 NOTE
1	ボディー	1	SUS304		
2	ペベット	1	SUS304		
3	力ラー	1	SUS304		
4	スプリング	1	SUS304WPB		
5	Oリング	1	バイトン P6		
6	六角形止め輪	1	SUS~12		

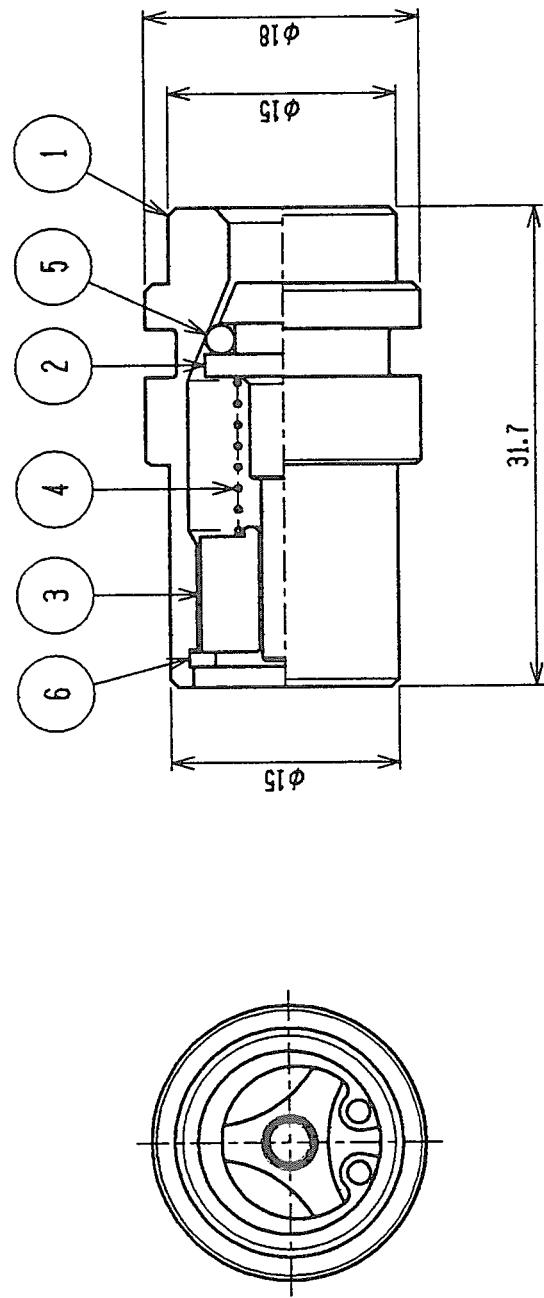
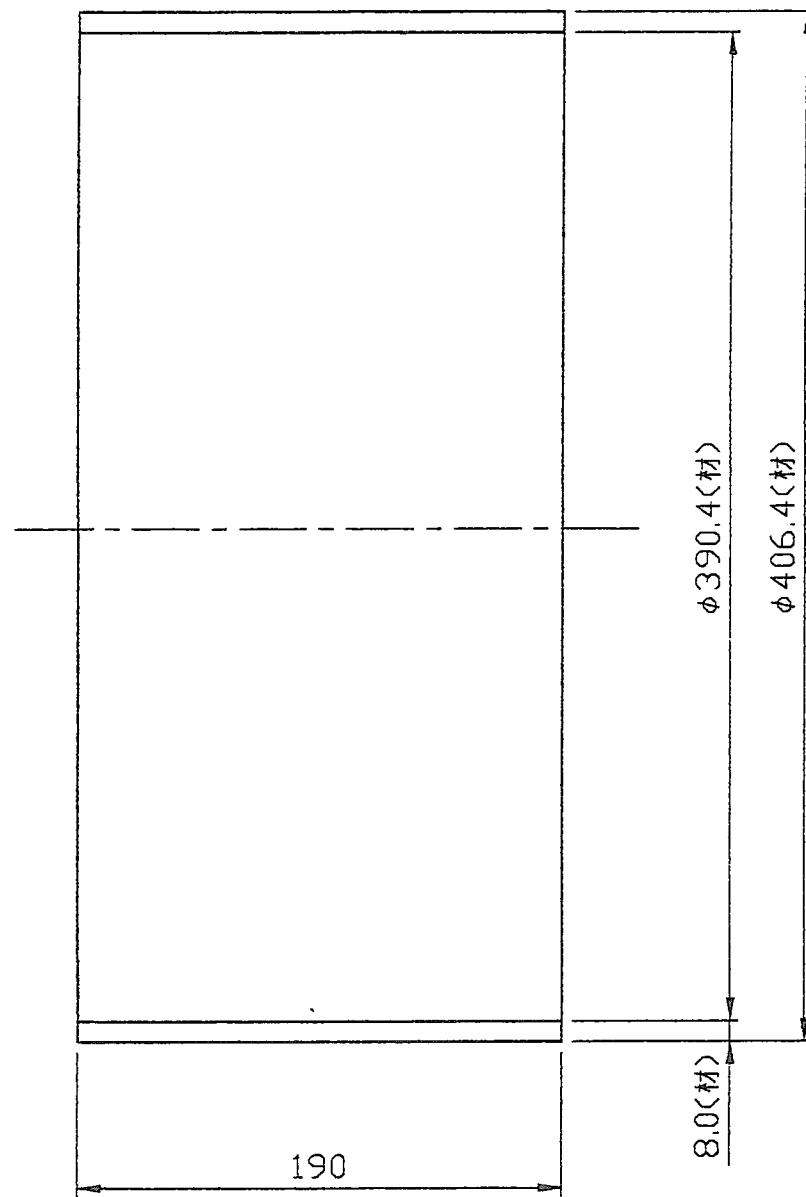


図 5.4 弁 (図5.2部品12)



注記1：指示なきコーナー部のメントリは、C0.5とする。

注記2：指示なき寸法公差は、JIS B0405中級とする。

図 5.5 CV水槽胴（全体図部品3）

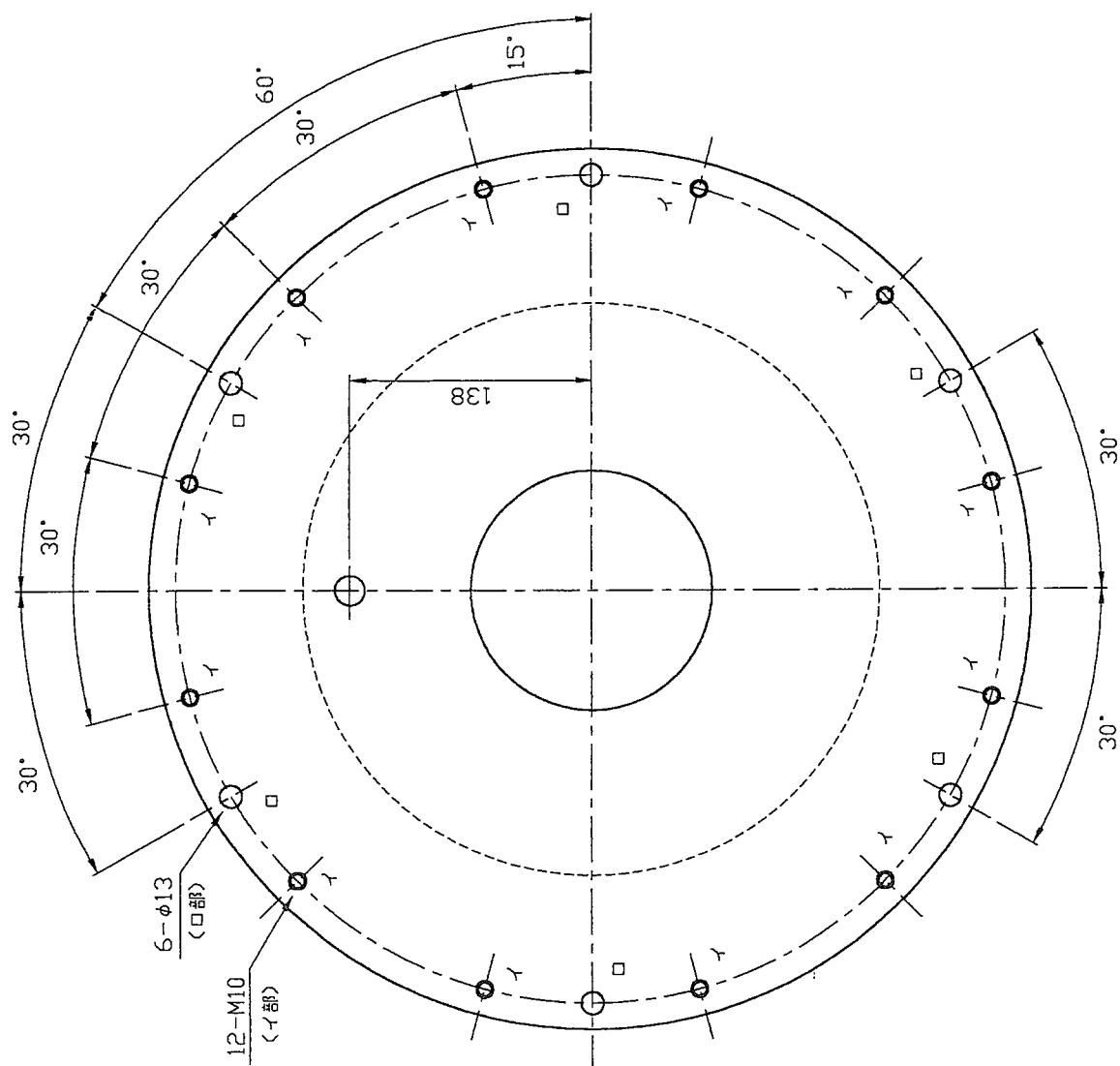
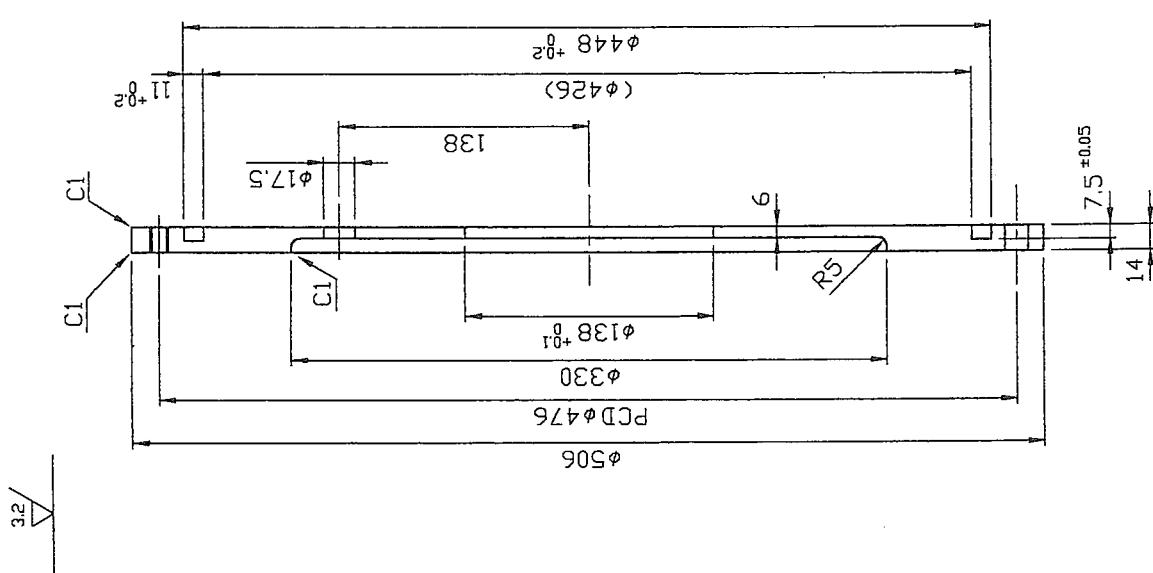


図 5.6 底板（全体図部品6）



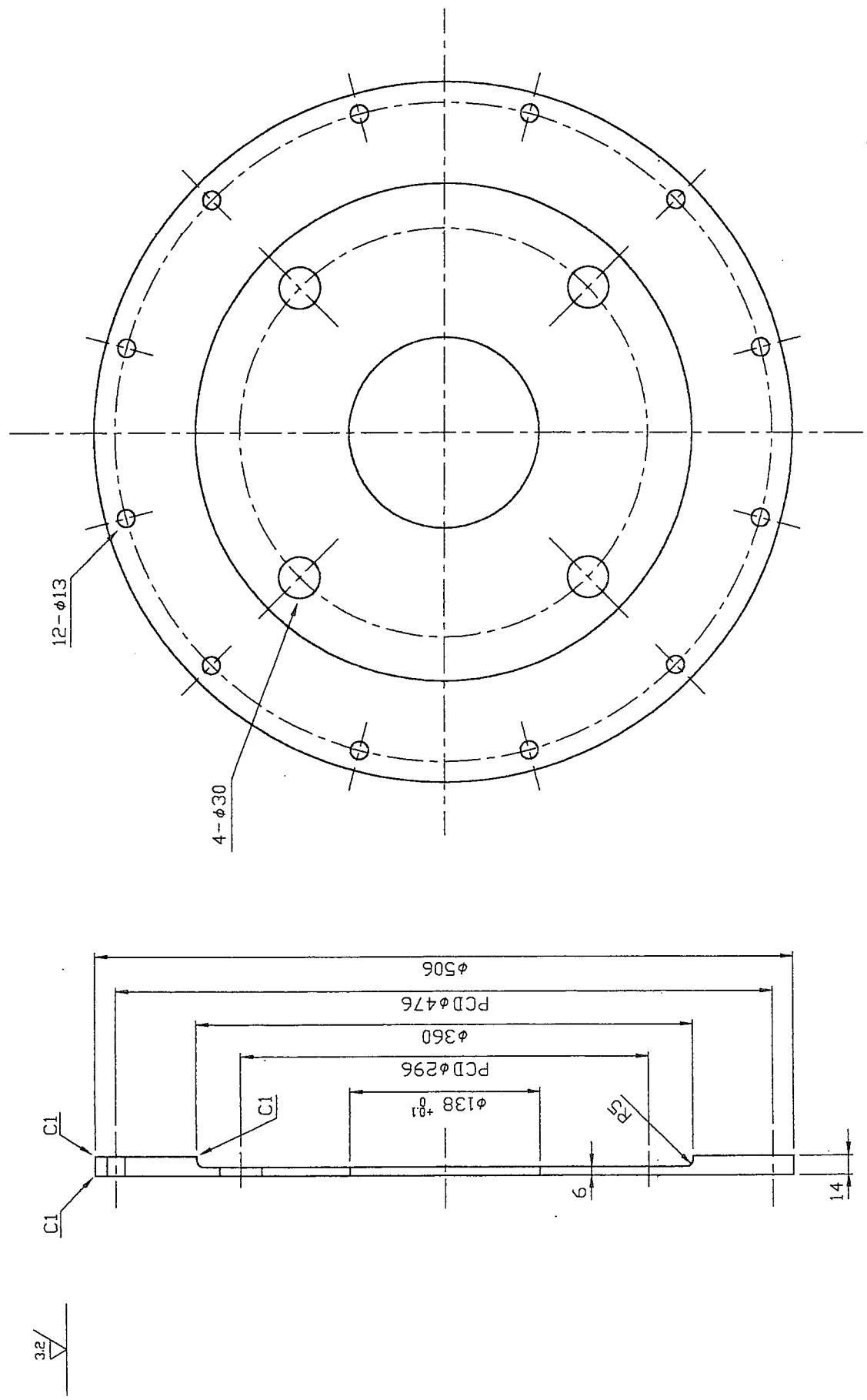


図 5.7 上部蓋 (全体図部品1)

上部ガイド
SUS304
下部ガイド
SUS304

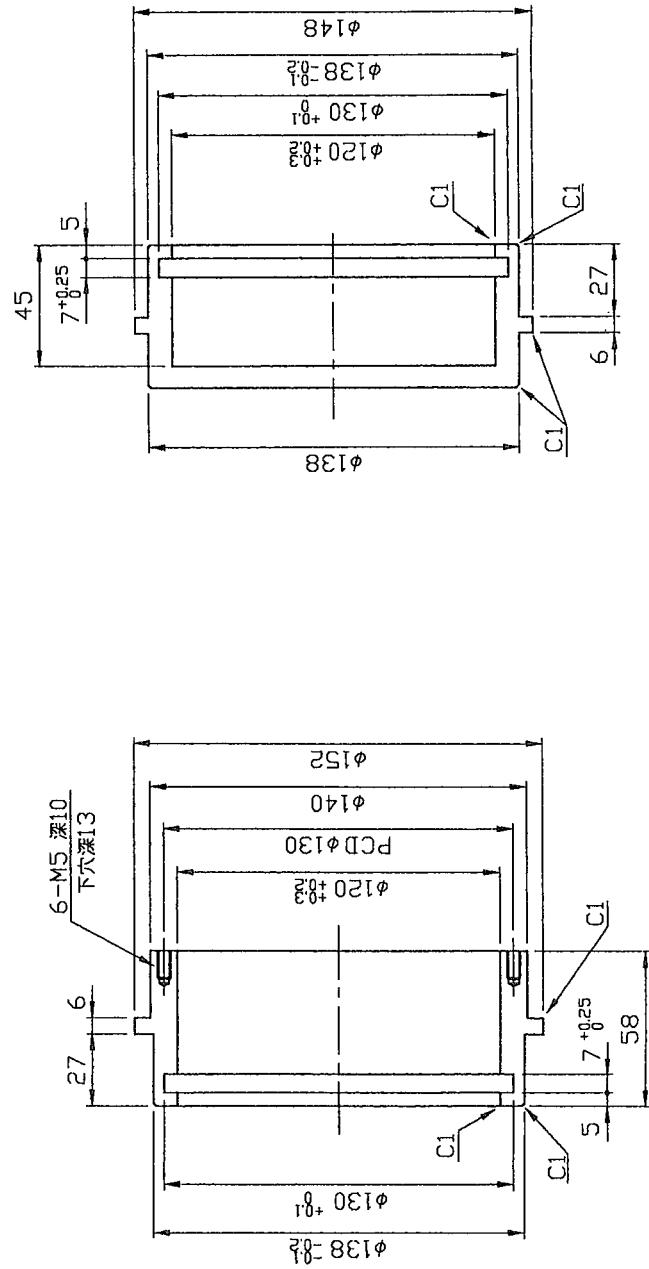


図 5.8 断熱材ガイド (全体図部品15, 24)

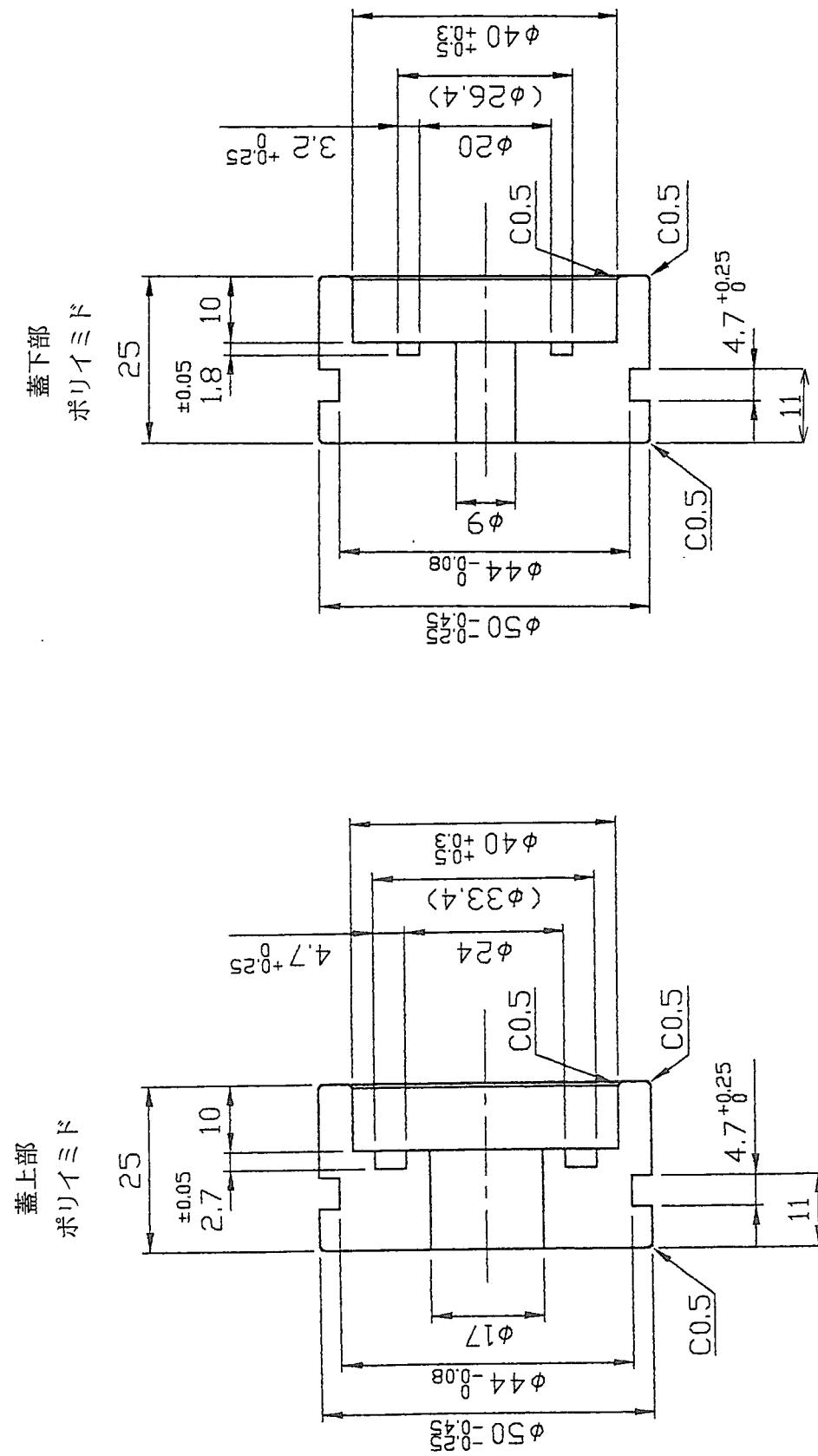


図 5.9 ヒータ蓋：蓋上部、蓋下部
(全体図部品19, 21)

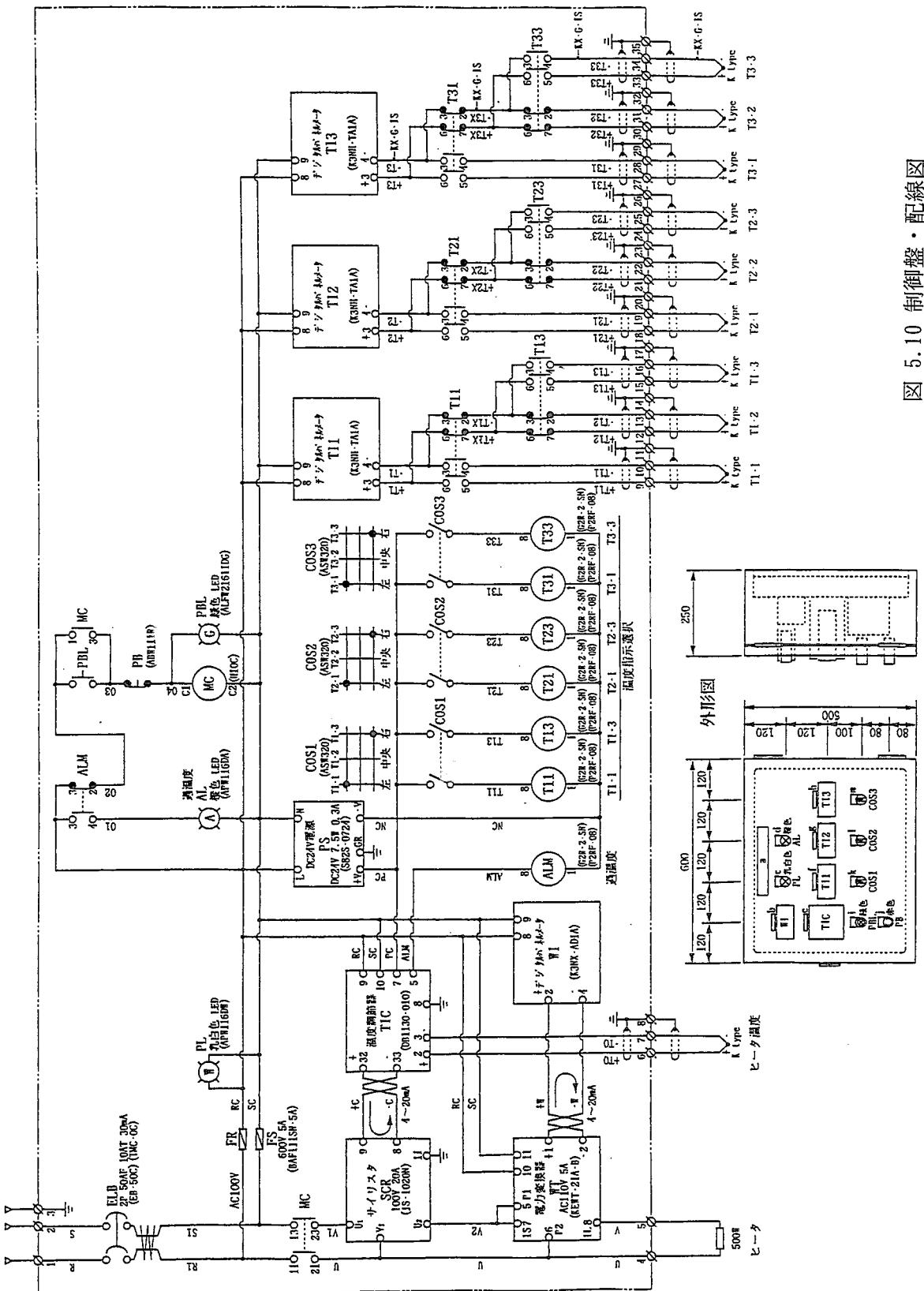


図 5.10 制御盤・配線図

図 5.11 配管温度と放熱量

—▲— gap:2.5mm —◆— gap:5 —●— gap:10

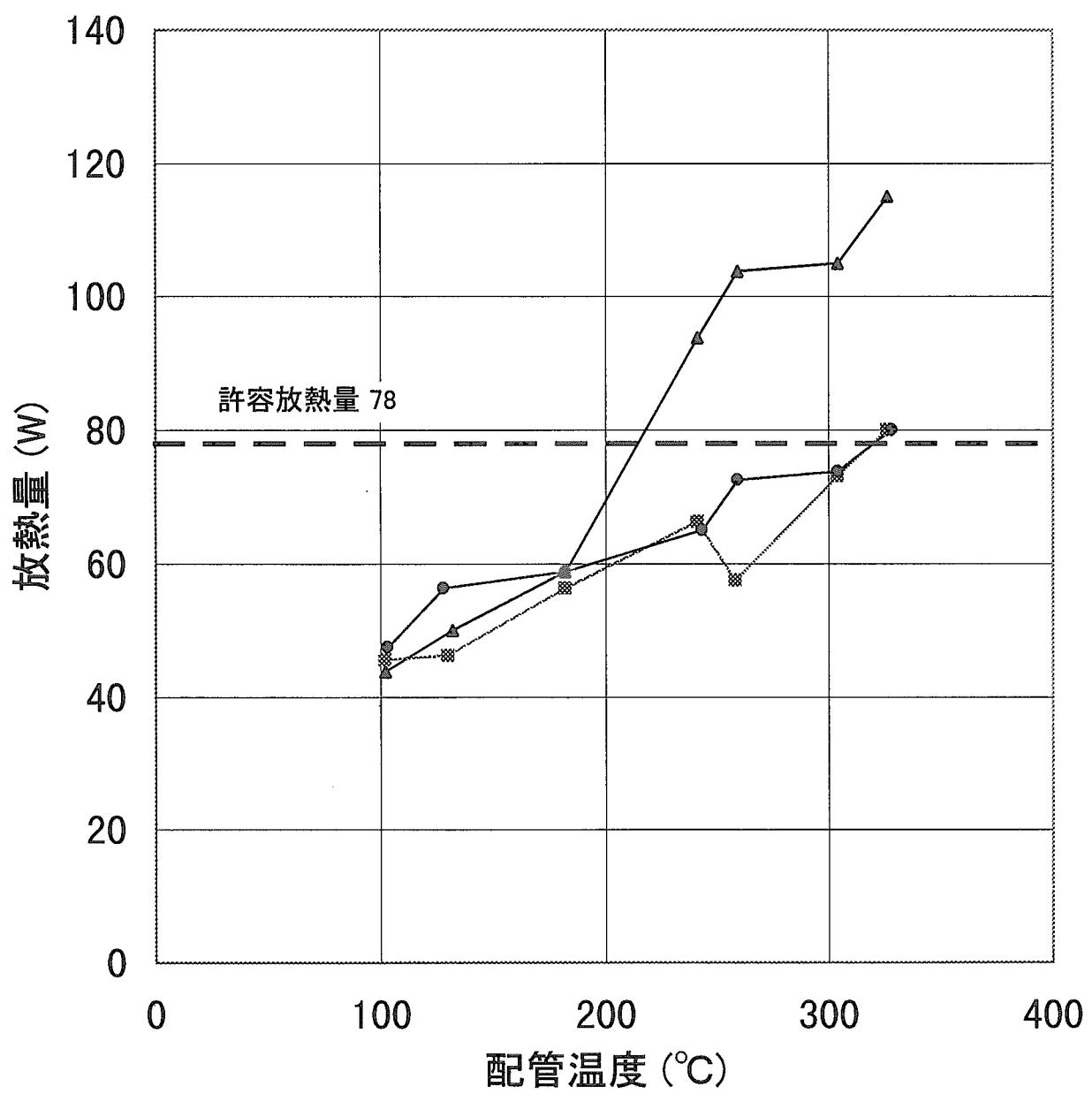


図 5.12 配管温度と蒸気層温度

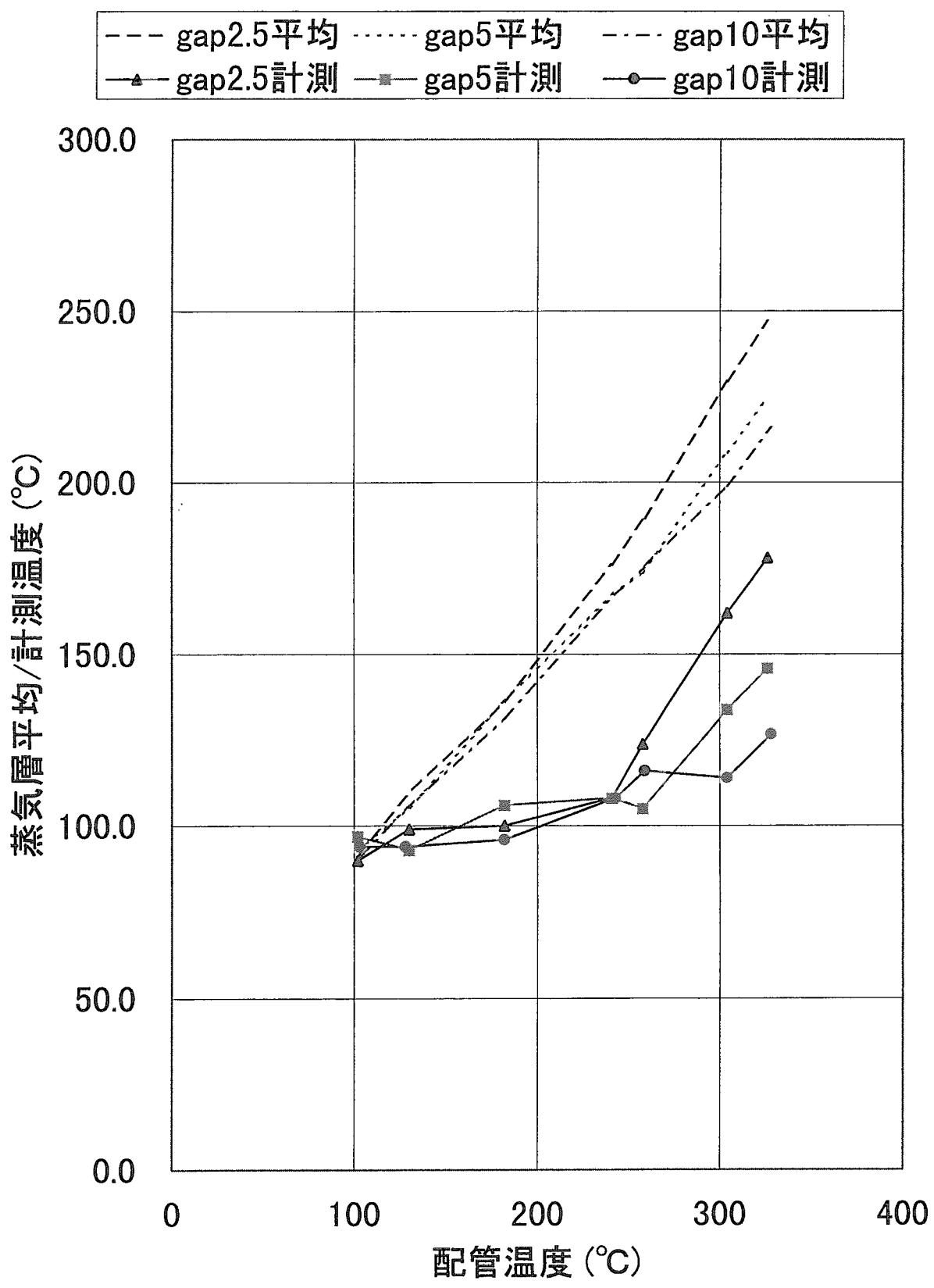


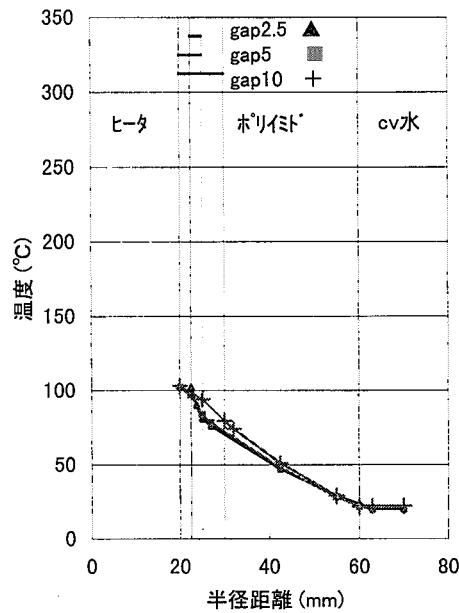
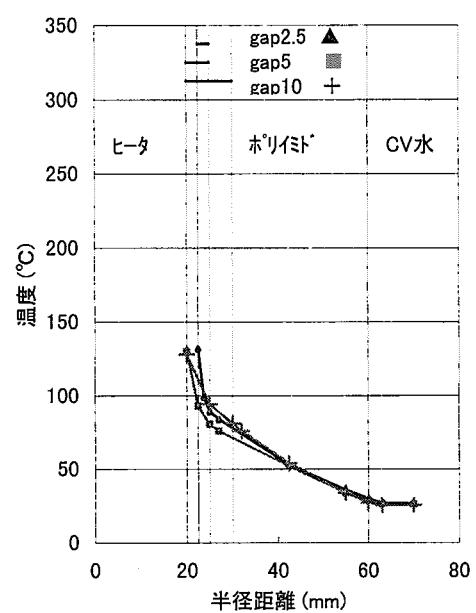
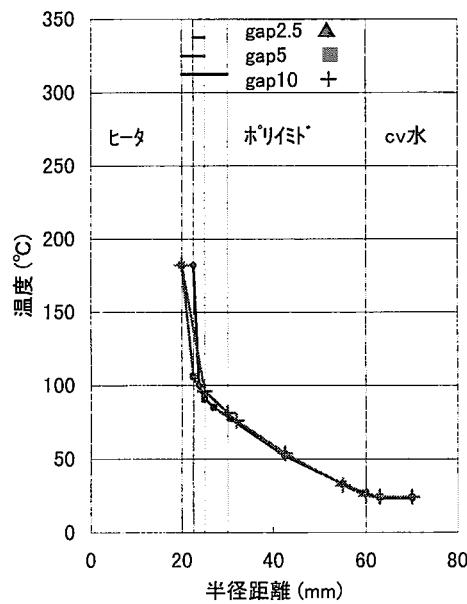
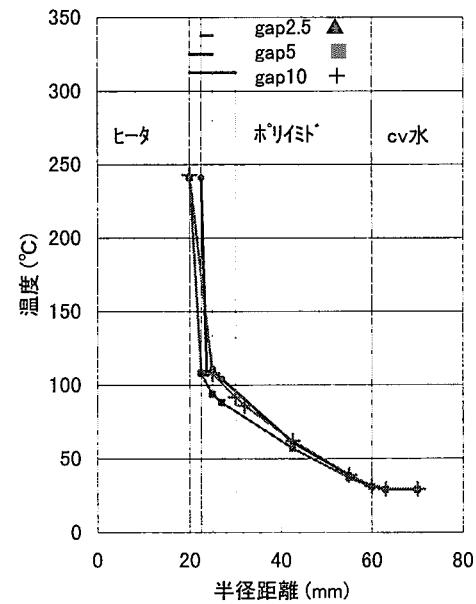
図 5.13-1 溫度分布一配管溫度102°C
(ケース24,44,54)図 5.13-2 溫度分布一配管溫度130°C
(ケース21,41,51)図 5.13-3 溫度分布一配管溫度182°C
(ケース22,42,52)図 5.13-4 溫度分布一配管溫度241°C
(ケース19,49,59)

図 5.13-5 溫度分布—配管温度258°C
(ケース25,45,55)

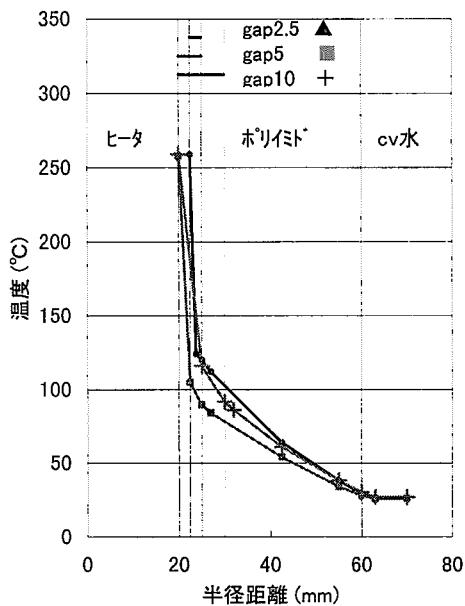


図 5.13-6 溫度分布—配管温度304°C
(ケース20,40,50)

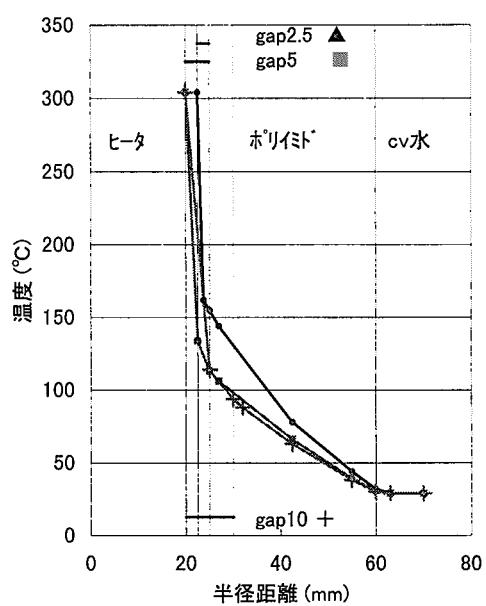


図 5.13-7 溫度分布—配管温度326°C
(ケース23,43,53)

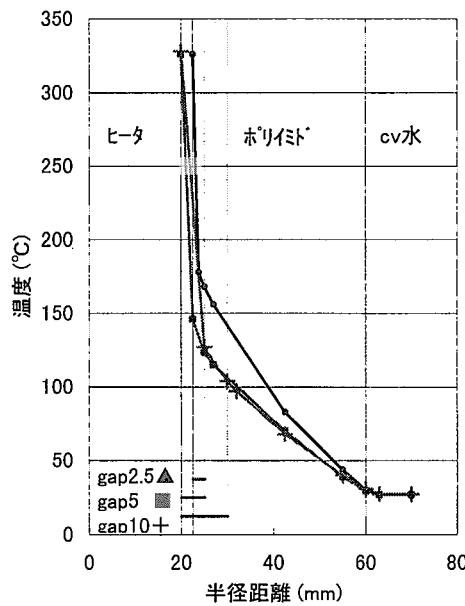


図 5.14 配管温度と蒸気層の温度差割合

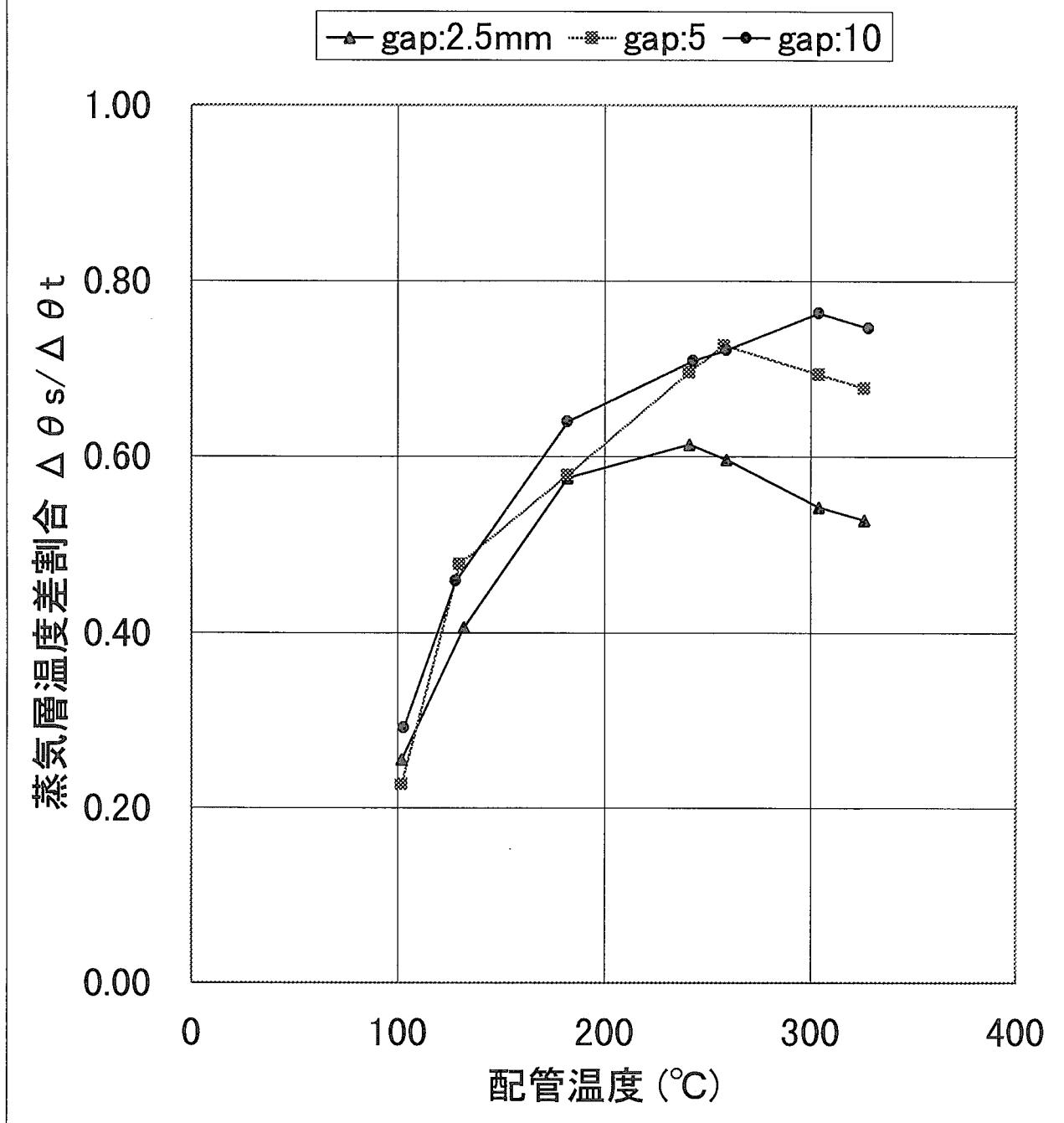


図 5.15-1 溫度分布—gap2.5mm

— 102°C ······ 182°C — 241°C --- 304°C — 326°C

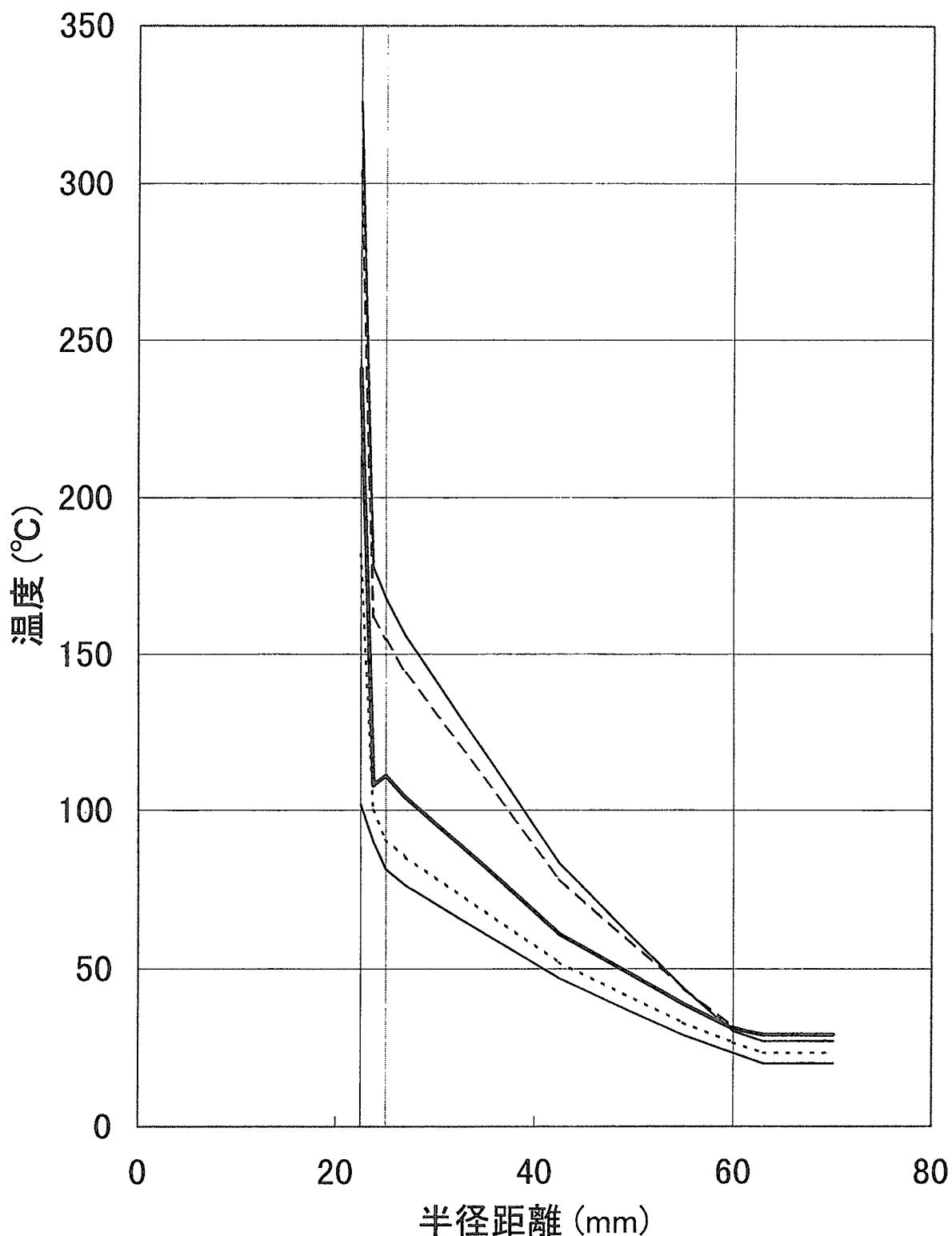


図 5.15-2 温度分布—gap:5mm

— 102°C 182°C — 241°C --- 304°C — 326°C

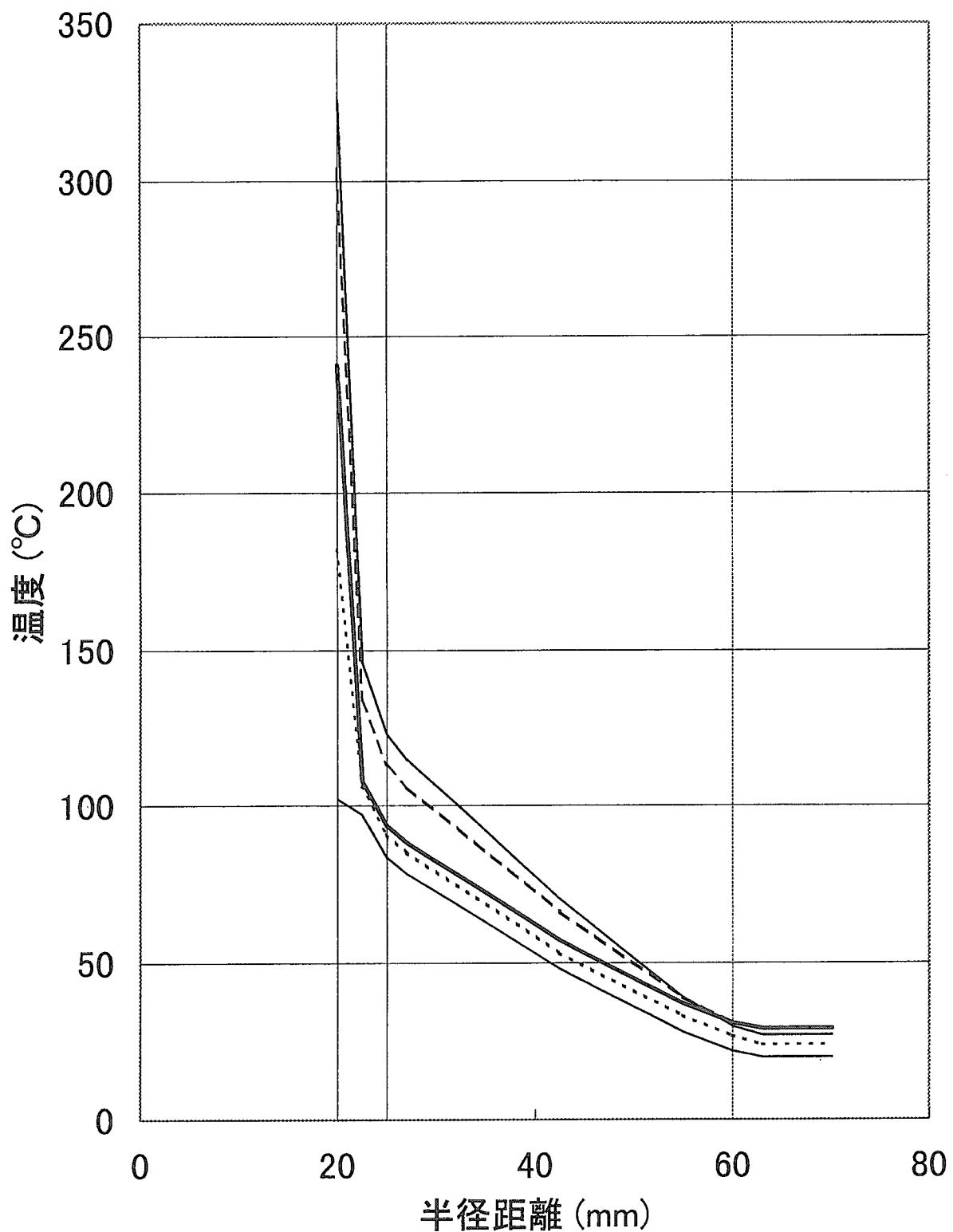


図 5.15-3 溫度分布—gap:10mm

— 103°C 182°C — 243°C --- 304°C — 328°C

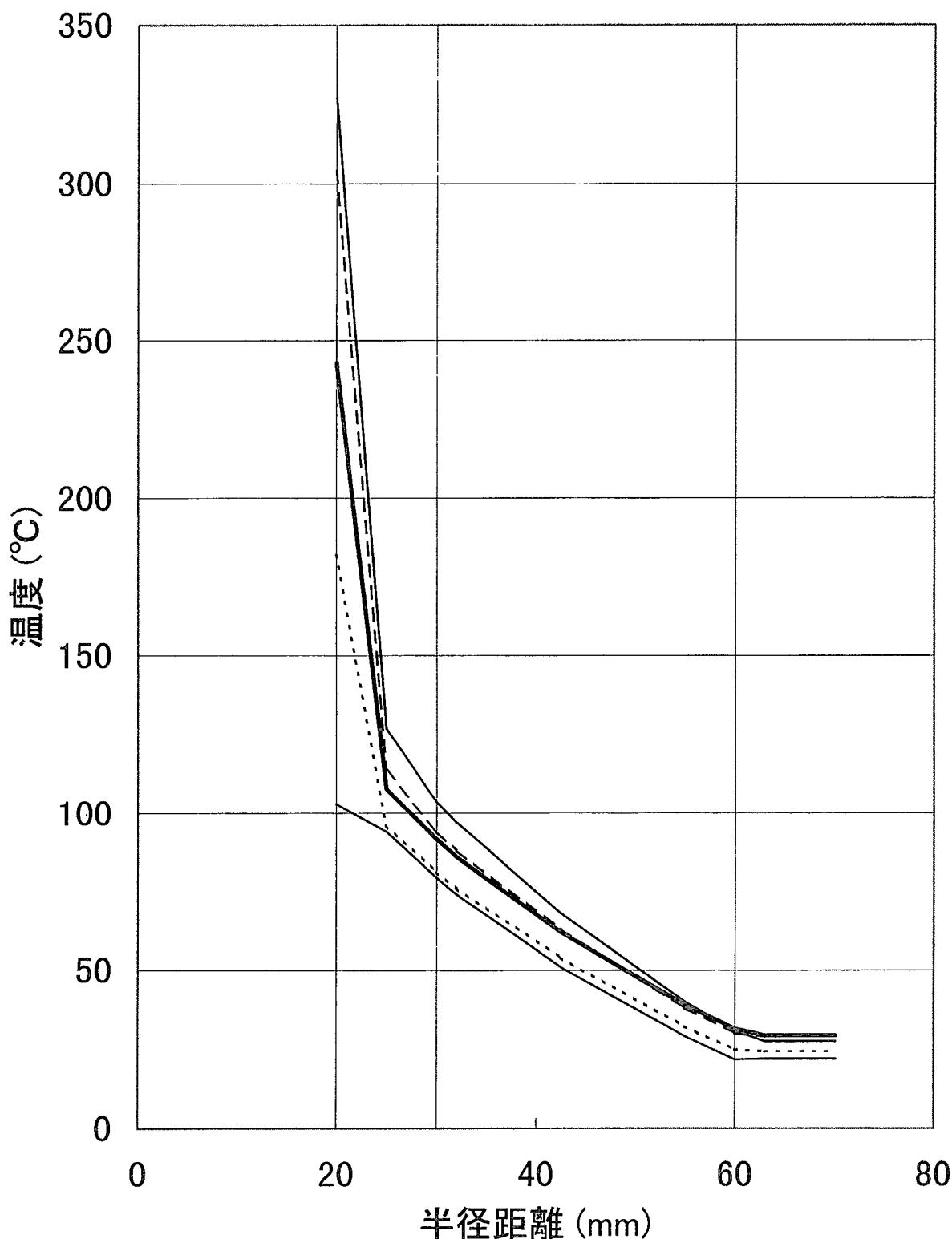
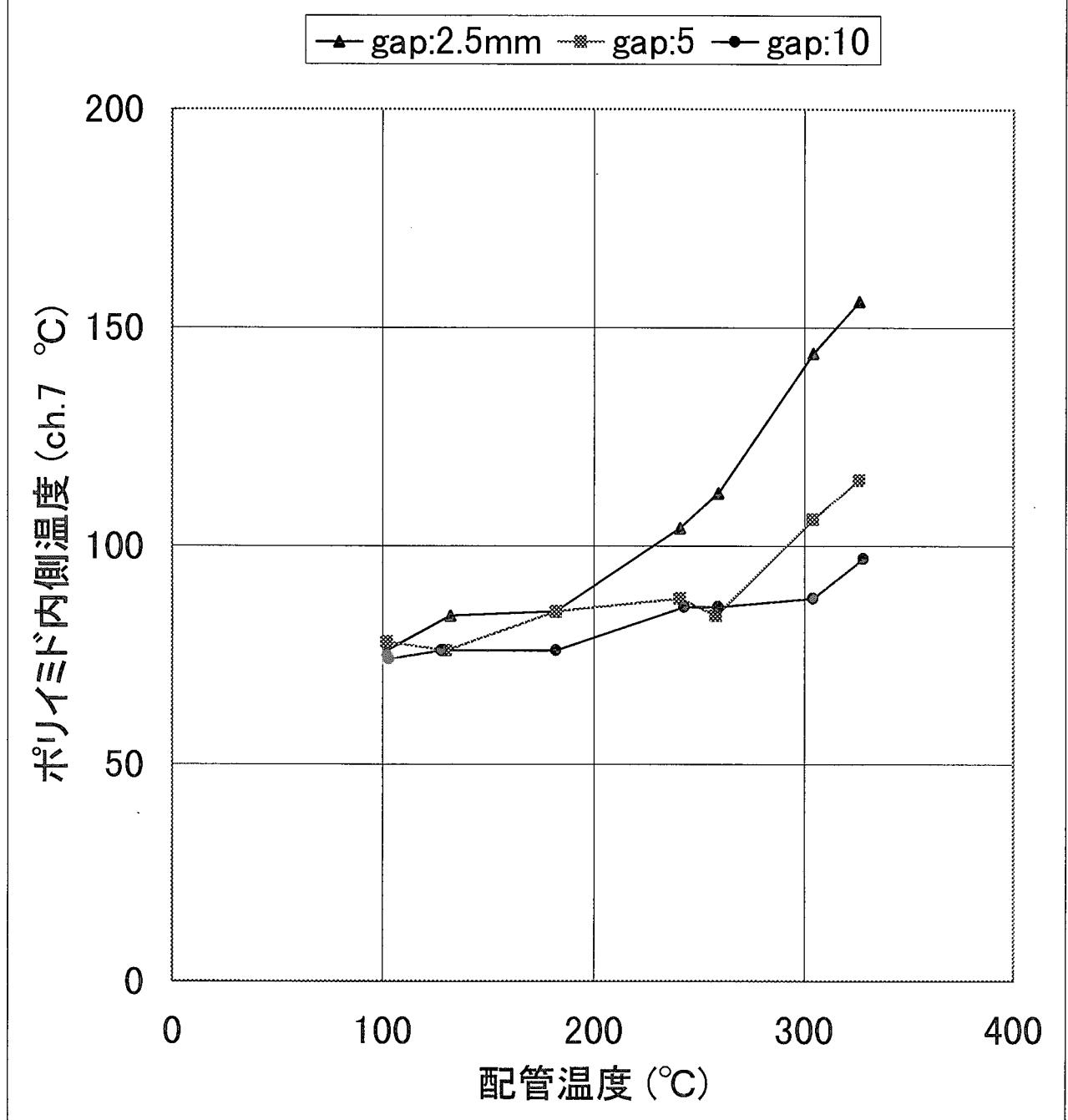
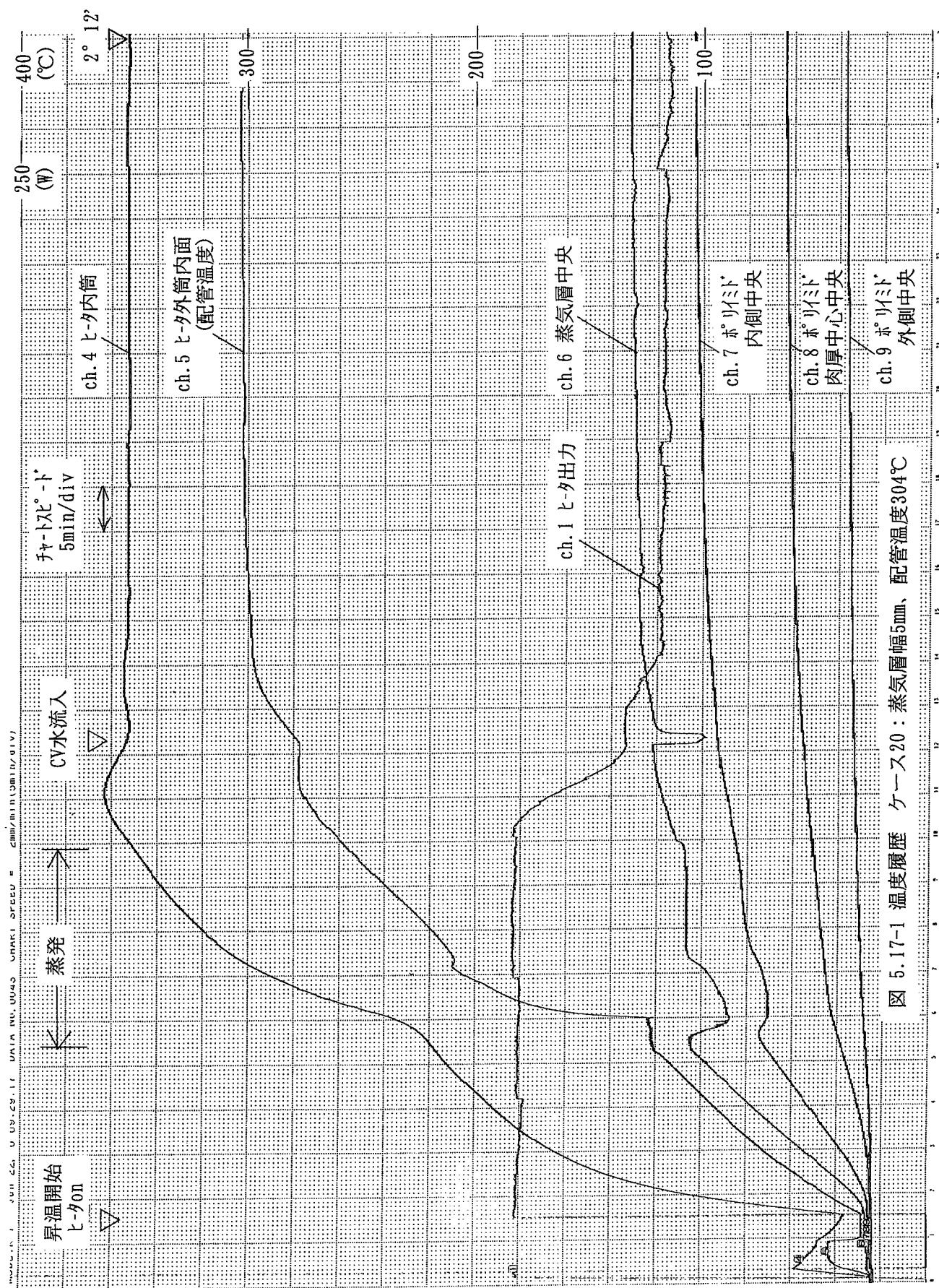


図 5.16 配管温度とポリイミド内側温度





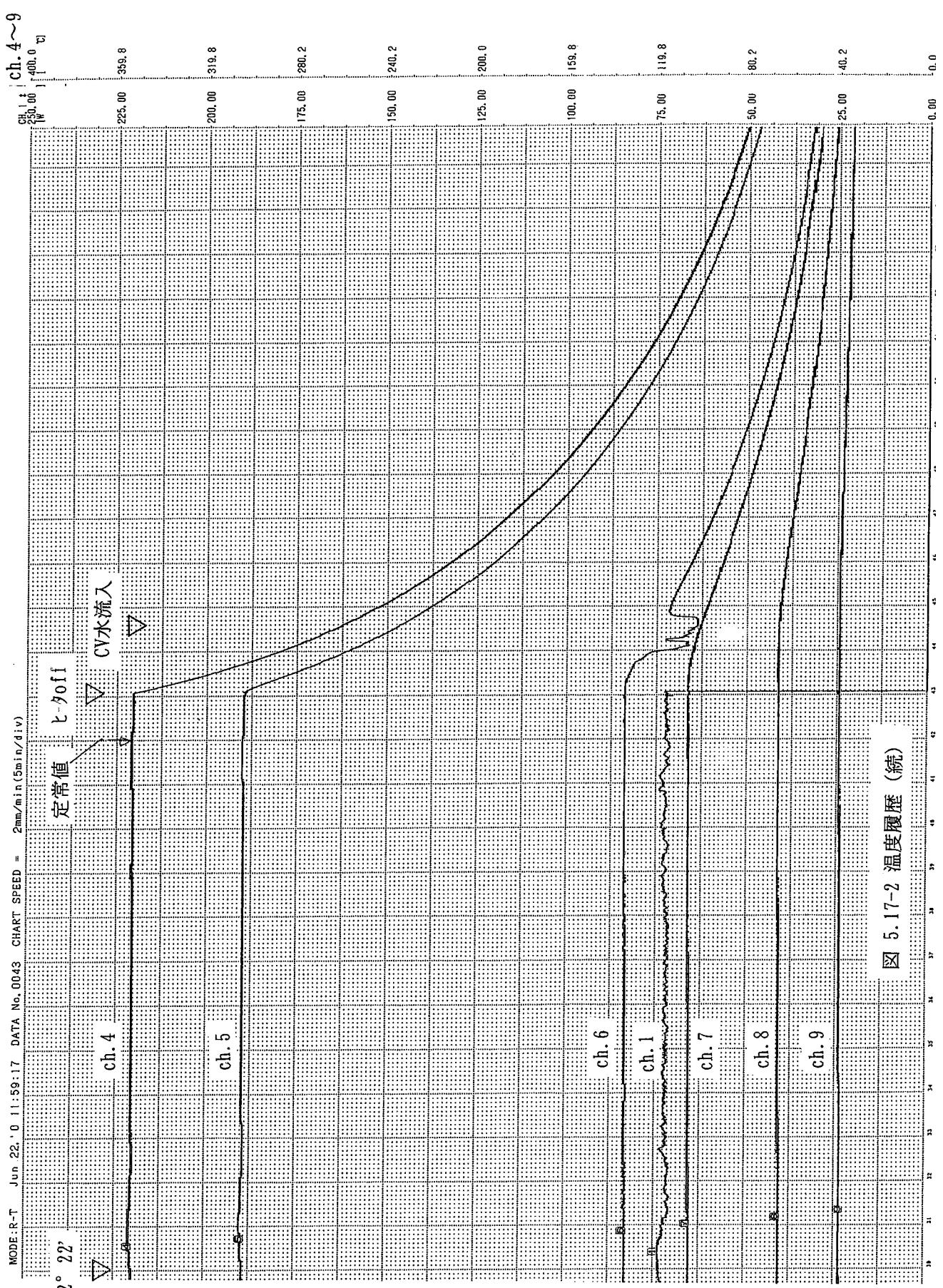
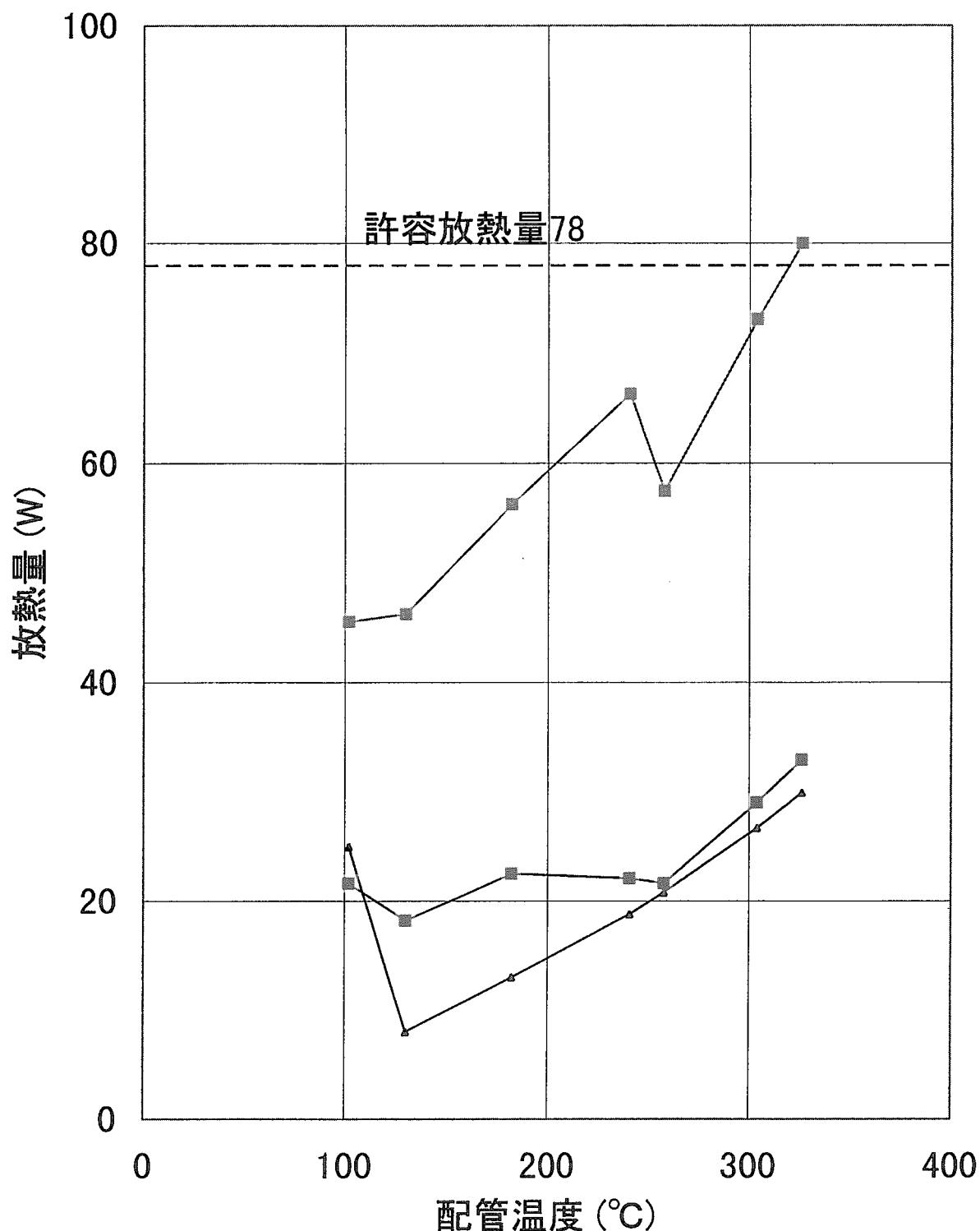


図 5.17-2 溫度履歴 (続)

図 5.18 放熱量比較－蒸気層幅5mm

--- qt 測定全放熱量
 -· q' 図3.3同様算出
 --- qp 半径方向(ポリイミド,算出)



付録-1水中断熱試験 実施レポート (抜粋)

No. 97-1

○試験体：珪酸カルシウム試験体NO.4（図一1構造図参照）

試験体完成図(ファイルNo.02204)では断熱材支持の支柱をボルト締めしてあるが実際は支柱は無い。

○実施日：'97.7.24-25 及び 8.5

○実施者：齊藤

○実施場所：新型炉実験棟

○経緯：試験体NO.2, 5, 6（珪酸カルシウム及びステンレスフェルト試験体）の試験において初めから水中に浸漬したところ、ヒータ表面が100°Cまでしか昇温しなかった。本試験体では水中に徐々に浸漬する方法で水中断熱機能を確認する。

参考：実験メモ「ステンレスフェルト+ステンレスコート（試験体NO.1）」

“ 「スーパー・シリカ1000+ステンレスコート（試験体NO.2）」

○試験方法：

(a)試験装置：水中断熱構造断熱特性試験装置（参考：同上装置完成図（大昭化熱工業（株）、ファイルNo.02204）

- | | |
|----|------------------------|
| 設定 | ・ヒータ部エア抜き：開放 |
| | ・断熱材エア抜き：閉止 |
| | ・ヒータ設定温度：7/25 実施：150°C |
| | 8/05 実施：300°C |

(b)計測装置：図一2 計測プロック図参照。

- | | |
|----|--------------------------------|
| 設定 | ・データレコーダ SCANインターバル = 10 (SEC) |
| | ・SRAMカード メモリーアクセス時間 = 20 (SEC) |

(c)試験手順

詳細は表一1に示す。概略は以下。

- ①試験体を水槽に設置後、大気中にて150°Cまで昇温、異常の有無をチェック。
- ②大気中にて300°Cまで昇温、数時間保持。
- ③上記②に続けて水槽に水張を開始し、試験体を浸漬させる。

○試験結果

①データレコーダ記録を図一3（大気中150°C昇温）、図一4（大気中300°C及び水中浸漬）に示す。

ビデオテープラベル名：“水中断熱材 TP NO.4 970701(1/2)”…大気中150°C

“水中断熱材 TP NO.4 970701(2/2)”…300°C

SRAMカードファイル名：“970101”…大気中150°C

“970101”…300°C

実験写真：添付に示す。

②図一4より大気中で300℃に昇温維持後、水槽に水を徐々に張ると、断熱材内外面温度(T4-2～T4-7)はもとより、ヒータ表面温度(T4-1)も急激に100℃まで低下することが判る。断熱材温度の低下する順序は下の温度計からの順になっており、水面の到達する順番になっている。

③経過

以下は300℃大気中及び水中についてのみ記す(図-4)。

- ・11:37、300℃到達でヒータON/OFF制御に入る。最高312℃まで到達するが、以降は310～298℃の間で制御される。
- ・制御盤試験体4 温度指示値はデータレコーダ 同温度指示値より約2℃低い。
- ・14:00 注水開始後、14:15頃から試験体上面(ヒータが断熱材を貫通している面)より蒸気または気泡が出始める。(14:12～14:13頃、下面に到達)
- ・14:17 試験体有効高さ(図一1の1050mm部分)の下2/5まで水面到達、上面の塗膜に膨らみが出始め、気泡も付く。
- ・14:25、下3/5到達、蒸気発生は止まる。断熱材エア抜きからは高温体の噴出はなし。
- ・14:30、下4/5到達、側面表面にも気泡が付着、断熱材の破片が水面に浮く。上面に明確な塗膜の割れ目ができる。
- ・14:35、下5/5到達直前、再び蒸気が出始める。
- ・14:37、下5/5到達し(すなわち上面まで)、完全に水没
- ・14:38、シューなる音とやや激しく気泡発生。水槽側は水面がオーバーフローへに達する。水位は上面より約10mmにて維持される。ch27(ヒータ表面温度)に不連続な動きあり。
- ・14:40、注水停止
- ・14:47、気泡発生ほぼ収まるが、その後再び発生し始める
- ・15:05、最後の細かい気泡も止む。
- ・16:00、ヒータ切り
- ・16:38、レコーダ 停止

○考察

①ステンレスコートの防水性

断熱材温度は内外面ともに水面の到達と同時に急激に低下することから、防水スプレー“ステンレスコート”は防水効果がなかったと言える。気泡はヒータ貫通部が複雑に入り組みスプレーが不均一だった上面のみでなく、側面からもほぼ一様に発生していた。このことは塗膜の一部が破れて内部への水路ができ、侵入した水が蒸発する、というような局部的な状況ではなく、全表面的な防水の破壊であることを示している。

②保溫材性能

(a) 300°C 大気中断熱性能

保温材外表面予想温度 75.3°C に対し、図一 4 より同約 74°C とほぼ一致した。

予想：伝熱工学資料改訂 3 版、A-b-1 “自然対流による垂直面の熱伝達”
に以下の数値を用いて算出。

雰囲気温度 $\theta_r = 25^\circ\text{C}$

断熱材熱伝導率 $\lambda = 0.045 \text{ Kcal/m h }^\circ\text{C}$ … チアスカタロウ 値、150°C

$x = 1 = 1.08\text{m}$ … 試験体有効長として仮定

平均体膨張係数 $\beta = 1/298.15$

以上より、垂直平板の式で垂直円筒をほぼ算定できることが判る。

(b) 300°C 水中断熱性能

100°C に低下したため比較不可能。（予想値は30°C）

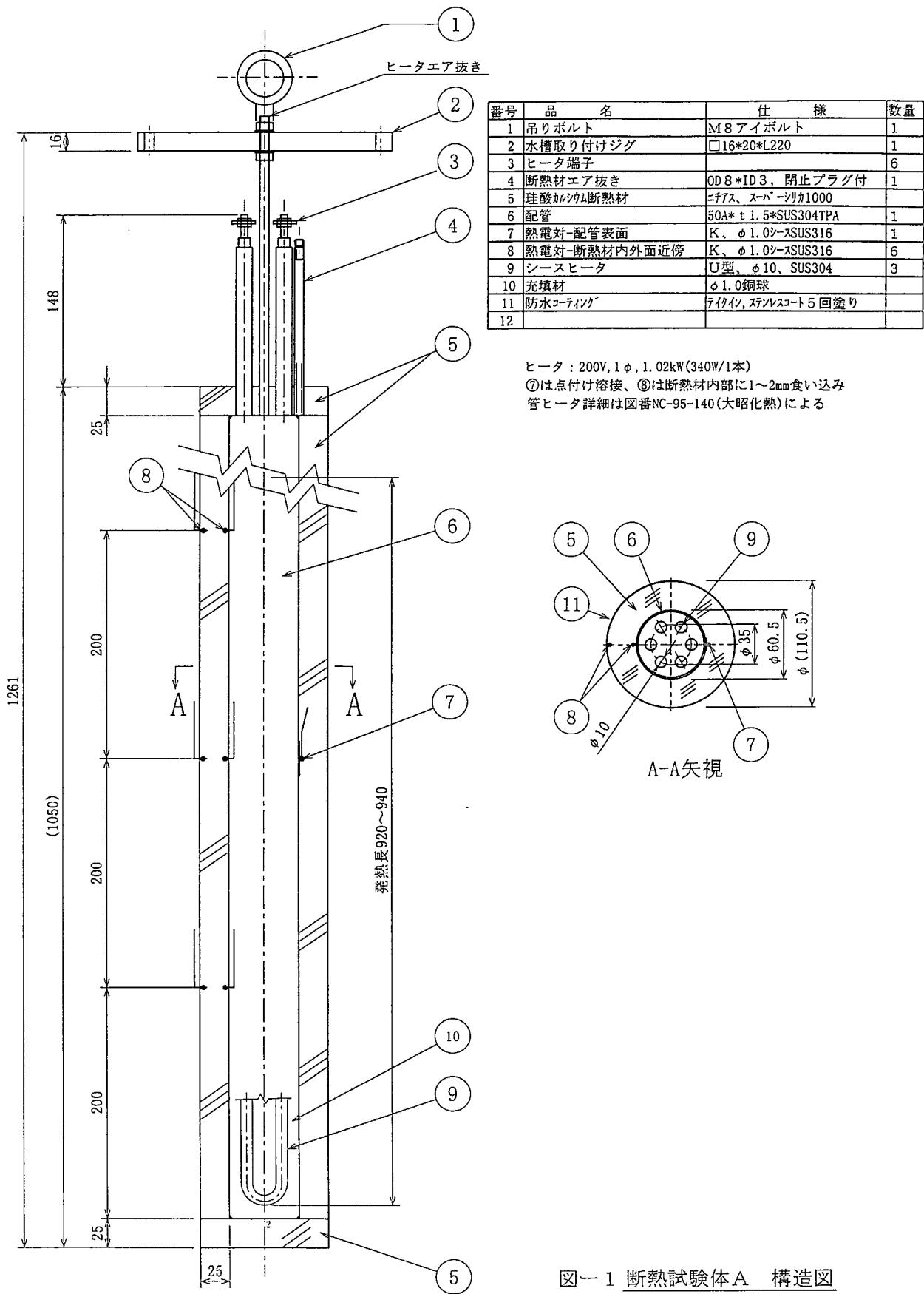


図-1 断熱試験体A 構造図

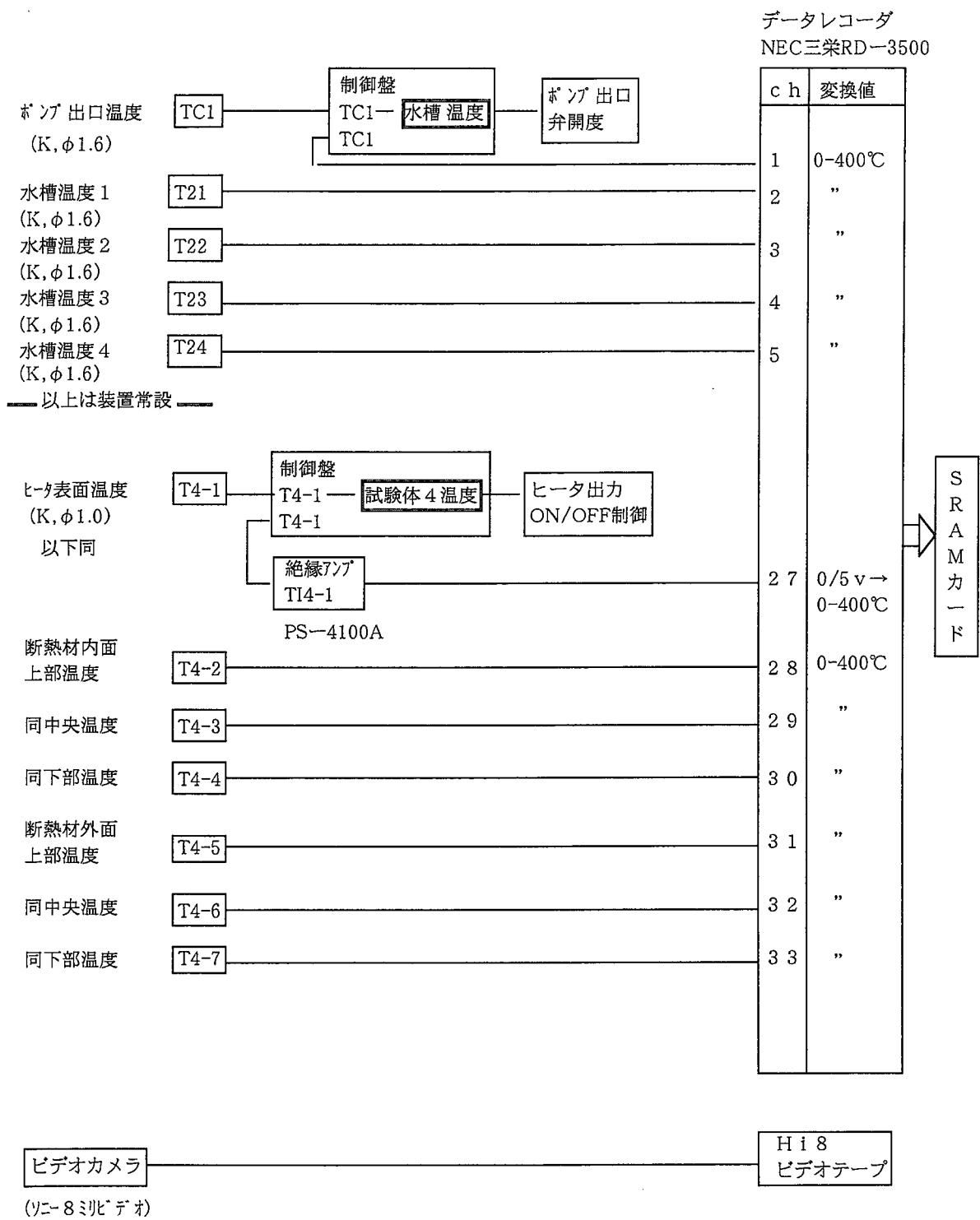


図-2 計測ブロック

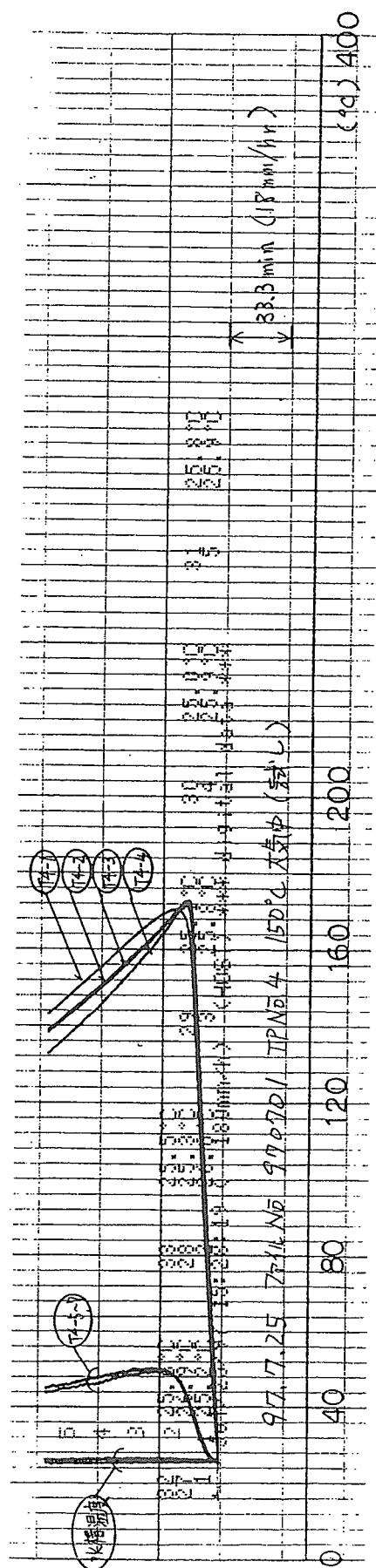


図-3 試験体NO. 4 大気中 150°C昇温

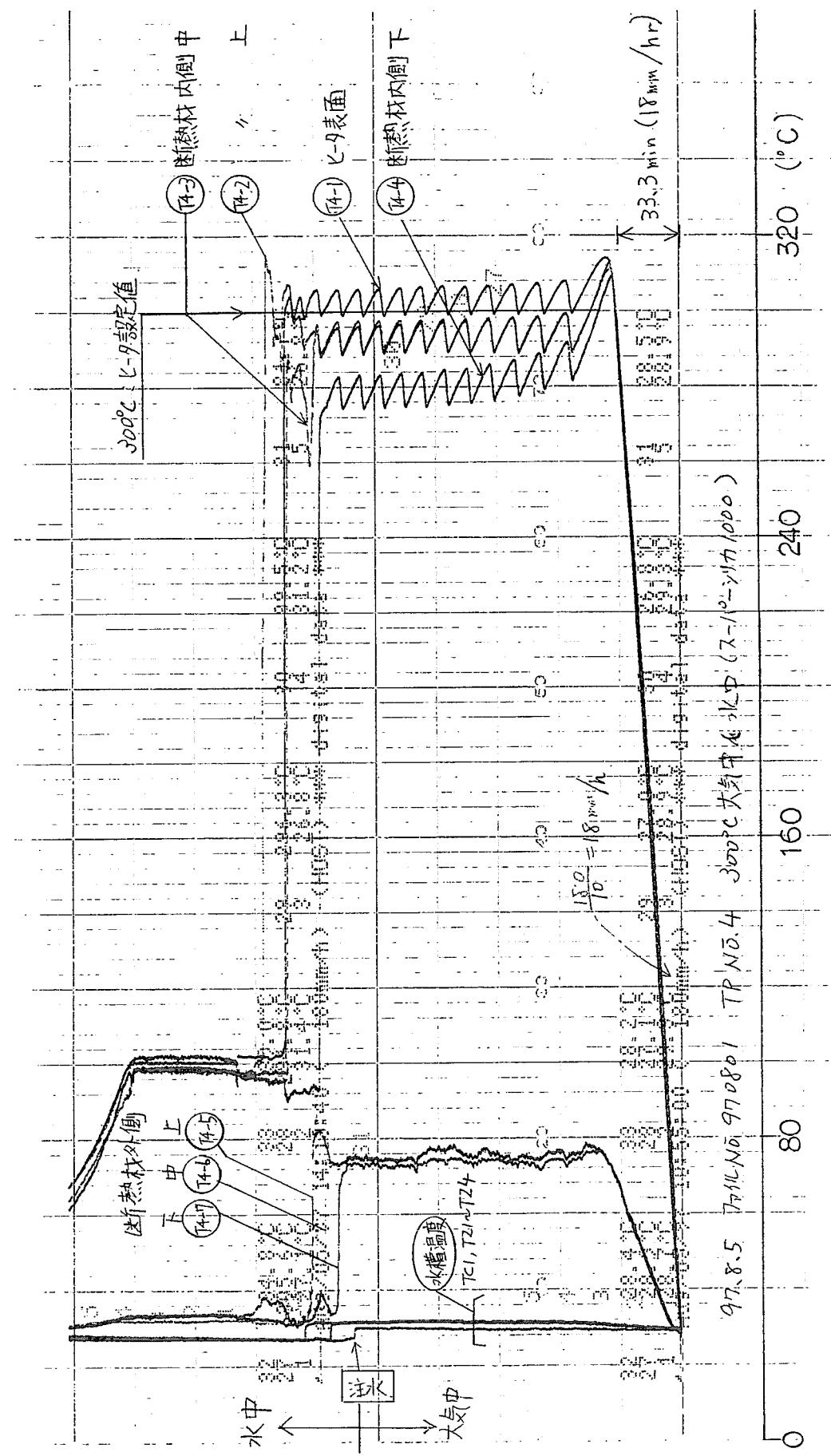


図-4 試験体NO. 4 300°C大気中及び水中浸漬

付録-2水中断熱試験 実施レポート (抜粋)

No. 98 - 2

○試験体 : ポリイミド試験体 NO. 9 (図一 1 構造図参照)ヒータ : $\phi 12$ シースヒータ、出力 300W断熱材 : 耐熱性熱硬化性高分子ポリイミド樹脂、
(新日産ダ'アモンド、セプラ)

被覆材 : なし

接着剤 : TGDDM エポキシ樹脂接着本剤 + DDM 硬化剤

TGDDM=テトラ グリシル ジアミノジフェニルメタン、
(住友化学、スミエポキシ ELM-434)

DDM=ジアミノジフェニルメタン、

(住友化学、SUMICURE M)

○実施日 : '98. 7. 30○実施者 : 斎藤○実施場所 : 新型炉実験棟○構造: ヒータに半割円筒形のポリイミドピース及び上下に円盤状ピースを取り付け、スペーサと合わせて上記接着剤で接着した。ヒータ貫通部も同接着剤でシールした。スペーサ : $\phi 50$ mm のポリイミド中実丸棒を縦に半割する際に切削代が約 3mm 必要であり、切断後に合わせると円形からはずれる。その調整に厚さ約 2mm のポリイミド製スペーサを用いて $\phi 50$ の円形を保った。

接着剤配合比、硬化条件は添付一 1 に示す。

接着剤は耐熱用エポキシ樹脂であり、熱変形温度は 240°C である(耐放射線性も優れている)。従って 300°C 近くまで温度の上がる配管表面近傍では接着性を期待できないものの、断熱材表面まで離れると温度は下がり、特に水中では 60°C 程度(格納容器水設計温度)のため使用に耐えうる可能性がある。

○試験方法 :

・試験装置 : 水中断熱構造断熱特性試験装置

(参照 : 同上装置完成図 (大昭化熱工業(株)、ファイル No. 02204)

設定 ① 内部エア抜き : なし

② ヒータ設定温度 : 試験体 No. 8 同様、割れを防ぐため 30-50°C 每に段階的に上昇させる。

・計測装置 : 図一 2 計測プロック図参照。

設定 ③ A/D 変換周波数 = 100 (mSEC)

- ・データレコーダ SCANインターバル = 10 (SEC)
- ・SRAMカード：メモリインターバル10(SEC)

○試験手順及び結果

①大気中 300°C から連続して水漬試験(7/30)

データレコーダ記録を図一3に示す。

ビデオテープラベル名：未記録

SRAMカードファイル名：“980730”

実験写真：添付に示す。

<経過>

10:31 レコーダー記録開始

10:43 TE-1 制御 SV 値=40°C にて大気中昇温開始。SRAMカード記録開始。

11:00 SV=60°C。TP-No.8 とはヒータの軸方向発熱分布が異なり、ポリイミド内側の上(TE-2)が下(TE-4)よりも低い。但し熱電対の埋込み深さが前 TP とは異なる可能性がある。内側中(TE-3)は殆どヒータ表面と同じ温度である。これも前 TP と異なるが、埋込み深さによる可能性がある。

11:20 SV=90°C、小さい“パキン”音発生、目視では異状無し。

11:38 ヒータ切り、外側の熱電対導線位置決めの針金を緩める and/or 撤去する（異音が数回あり、針金の切断、熱膨張拘束の解除のため）。

11:50 SV=90°C にセットしヒータ再投入。

12:17 SV=130°C

12:40 SV=170°C、“パキ”音する。

13:00 SV=200°C

13:21 SV=230°C、再び音。

13:50 SV=250°C

14:13 SV=275°C、小さな“ガガガ”音。

縦方向スペーサの中央付近が樽状に膨張している模様。残っている針金は緩く、拘束はしていない。音継続。

14:38 SV=290°C、音継続。

14:55 SV=300°C、音継続。最高 312°C まで昇温。“パキ”音が数回発生、割れている模様。外面目視では割れ等はなし。

15:47 外側温度 (TE-5,6,7) 平行か下がり気味で定常に達したと判断。

15:50 水漬け開始、水位、試験体底部直下。

15:51 水位、底から 20mm。スペーサ部と底部で破損。内部に浸水し破損部から気泡 or 蒸気発生。破損は上下に繋げたスペーサの接着面と低板の接着面がせん断破断したもの。

15:53 ヒータ切り。

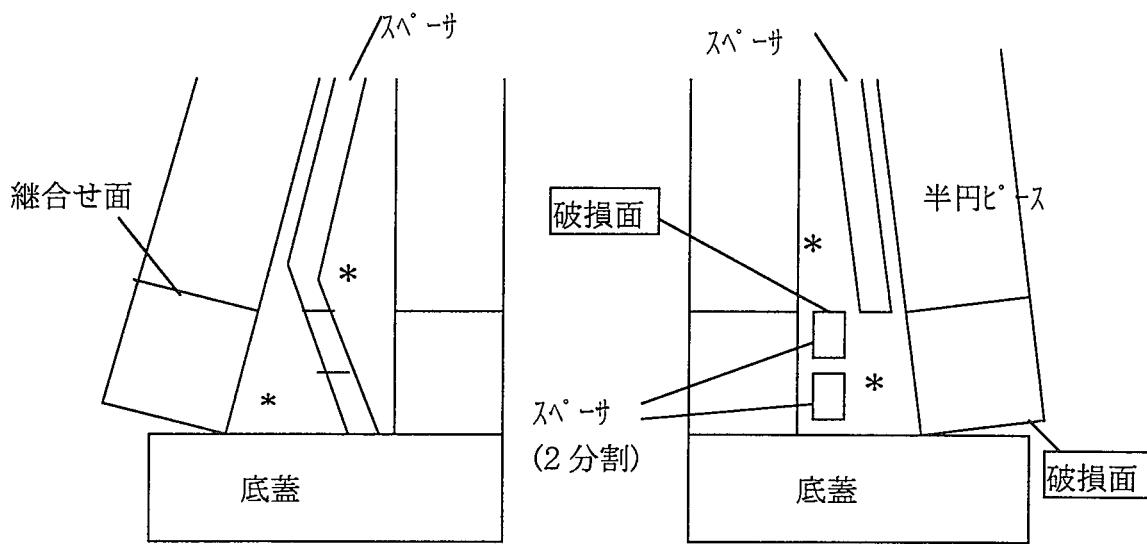
16:00 SRAM 停止、水位低下させる。

16:30 レコータ停止。

③考察

(1)割れの原因

破損部形状は強調すると下図(写真参照)。



0 度側面、下部

180 度側面、下部

破損面：180 度側の側面下部で底蓋(円盤状)と下側半円ピースとの接着面、及び下部の小スペーサと上部の長いスペーザとの接着面が破損(せん断)した。

これに伴い、図の*部の接着面もはがれています。

*部からは内部のヒータが見える。

以上の状況から、熱膨張による半径方向のせん断力が接着力を上回ったものである。試験体上下は円盤状の底蓋で(半径方向には)固定された状態。この状態で樽状に膨らもうとする熱膨張力がせん断力として作用し最も弱い接着面が破損したものと考えられる。接着力は温度の上昇とともに低下し、また耐熱温度も 240°C であるため内側の接着剤は溶解したことも考えられる。

(2)ポリイド 外面温度

空気層を無視した計算と定常時の比較は次表の通り。

ヒータ温度	条件	実験定常値(°C) 外面、中(TE-6)	計算値(°C)	備 考
大気中 300°C	大気温度(°C)	128 (25)	204 (25)	図-3、5°付近

	(°C)			
水中 300°C	水槽温度 (°C)	得られず	29 (20)	

- ・ヒータは軸方向に分布して発熱し上下は 300°C よりも低い。中の表面温度を 300°C に ON/OFF 制御しているため、外面-中の TE-6 で比較する。
- ・実験のヒータ温度は平均 303°C (298 - 308) である。
- ・計算式：伝熱工学資料、改 3、P. 20 自然対流による垂直面の熱伝達、層流、一様伝熱面温度において、

$$\text{伝熱面高さ } l=0.225\text{m}.$$

熱抵抗 R は同資料 P. 263(4) 式において、

$$\lambda_1=0.39\text{kcal/mh°C} \text{ (宇部興産カタログより、新日産ダイヤモンドセプラも同じ製品である)}$$

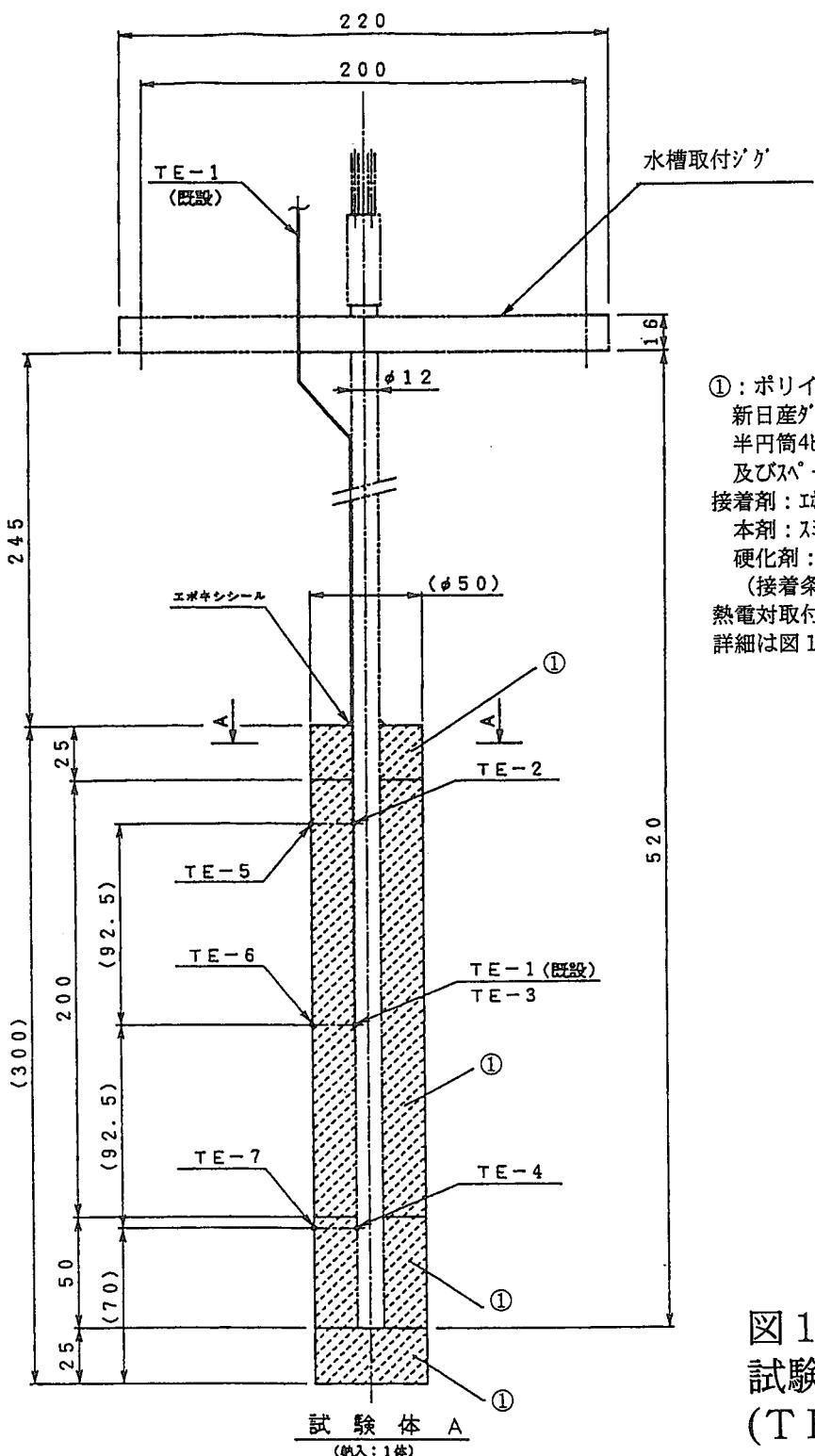
$$r_1=0.006\text{m}, r_2=0.025\text{m} \text{とした。}$$

大気中では 80°C 近い相違が出ている。熱伝導率の違い、空気層部分での温度低下、熱電対取付け深さ、試験体が短く計算式に乗らない、等が考えられる。

予想温度よりも低いことは断熱性能としては良い方向。

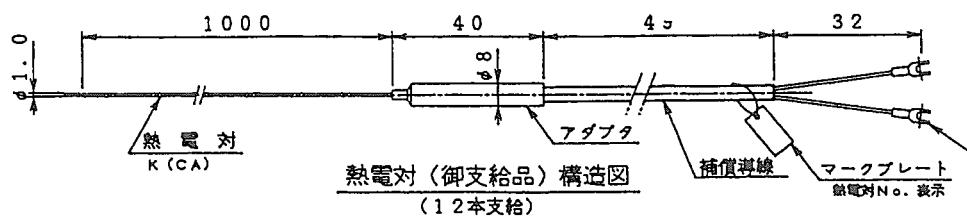
(3) 接着剤の防水性

この接着剤のみでポリイミドを水中断熱材として使用する事は防水性が確保できないことが判明した。ただし内面温度が 300°C でも少なくとも外表面付近での溶けだしありは無いことが確認できた。



①: ポリイミド断熱体
新日産ガイヤモンド、セプラ
半円筒4°-ス、上下円盤蓋
及びスペーサをエポキシで接着。
接着剤: エポキシ樹脂
本剤: エポキシELM-434
硬化剤: SUMICURE-M
(接着条件は添付-1)
熱電対取付方法及びスペーサ
詳細は図1(2/2)に示す。

図1(1/2)
試験体構造図
(TP No. 9)



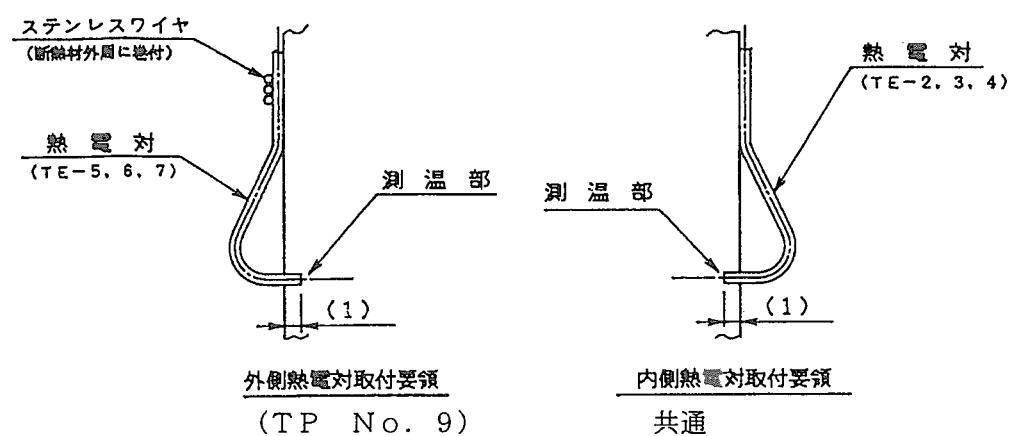
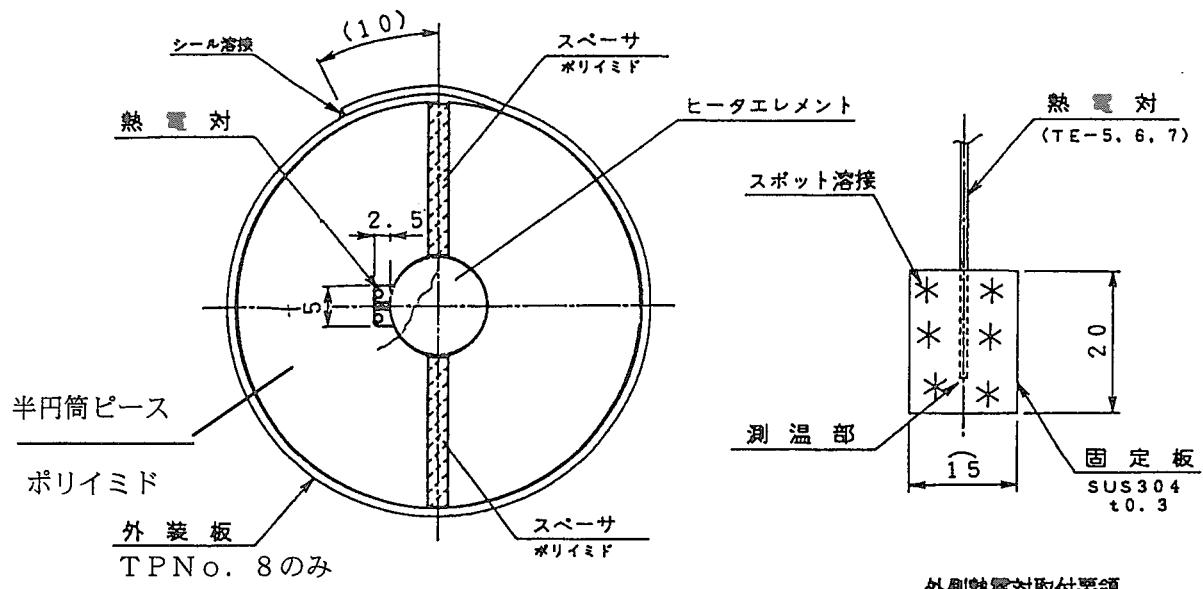


図 1(2/2) 外装板、スペーサ、熱電対取付詳細

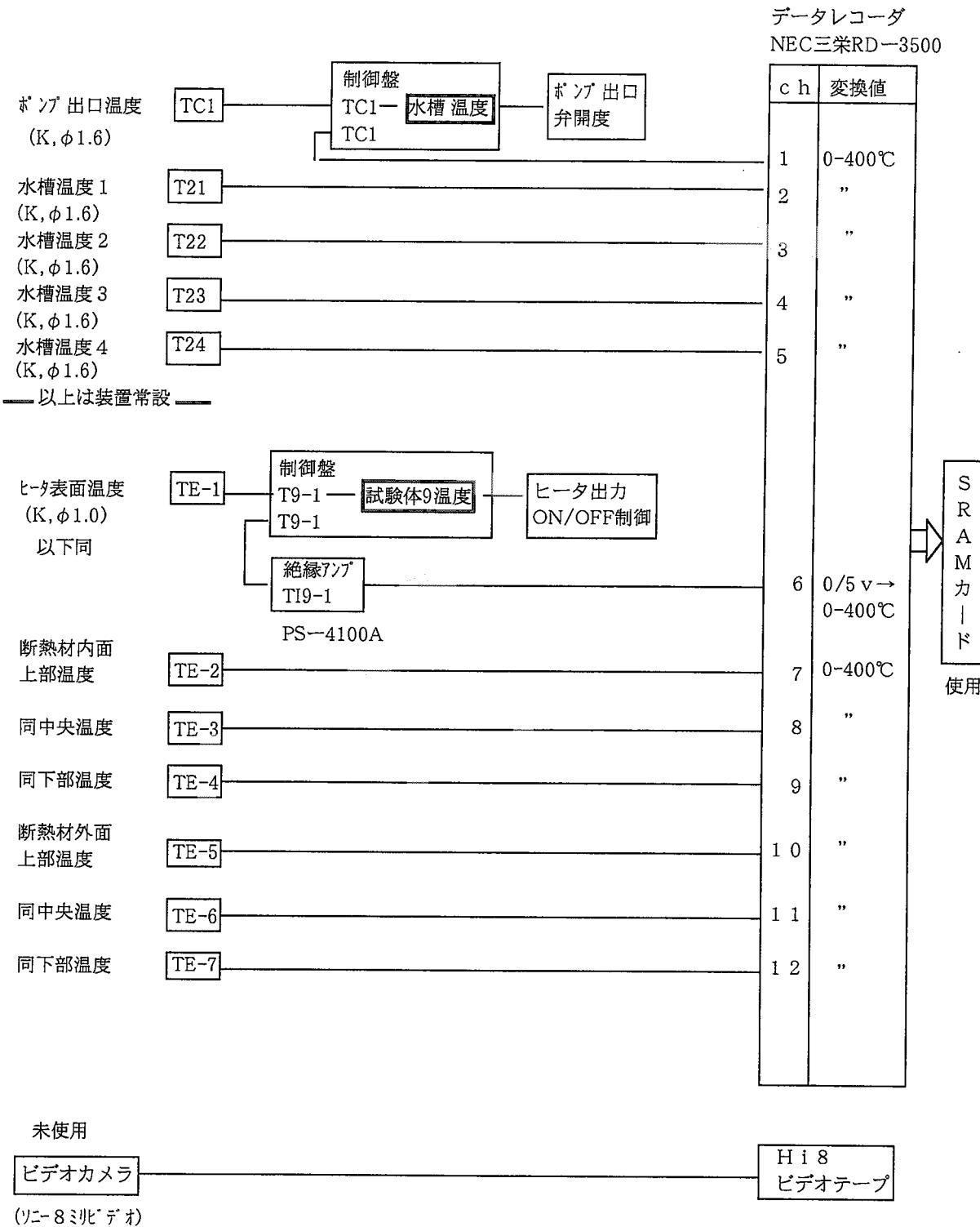
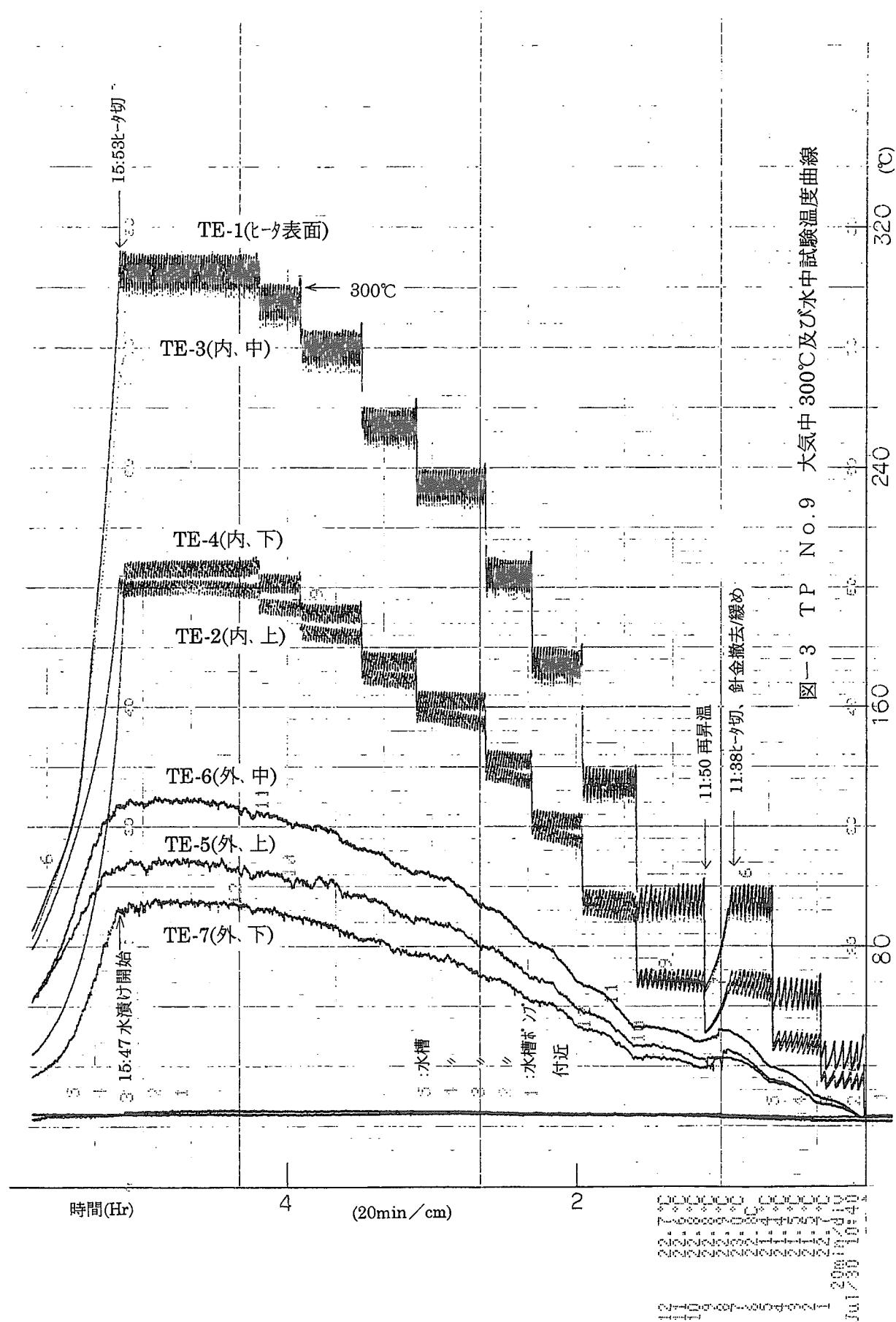


図-2 計測ブロック (試験体No. 9)



国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

1. 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値だった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J(熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J(15 °C)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

